

Trabajo de final de grado - ETSEIB 2016

Estudio mediante CFD del alerón trasero de un monoplaza con el DRS abierto y cerrado en diferentes circuitos

Carlos Murillo Fuentes

Director: Enric Trillas Gay



Resumen

La fórmula 1 es un deporte muy exigente, en dónde la aerodinámica ha ido cobrando cada vez más importancia hasta el día de hoy, en el que es un pilar fundamental de la competición sin el cual no serían posibles los vehículos que compiten día tras día en los diferentes circuitos.

Este documento se centrará en la que ha sido una de las últimas innovaciones en el campo de la aerodinámica que se han incluido en este deporte, el DRS.

A lo largo de la memoria, se explicarán los principios básicos mínimos para poder entender su funcionamiento, y se analizará una aproximación a la realidad obtenida a partir de perfiles GOE con el software CFX de ANSYS. La finalidad de este proceso, es proporcionar datos veraces y fiables que nos permitan un mayor entendimiento de este dispositivo así como valores numéricos que nos permitan determinar de manera aproximada el impacto que puede tener este dispositivo en un monoplaça de la fórmula 1.

Este documento, se tratarán cuestiones como el ángulo de ataque, los coeficientes de sustentación y resistencia al avance, la diferencia de presiones que origina la geometría de un ala y el impacto de la velocidad en el rendimiento de un perfil.

Finalmente, se concluirá con una breve comparación del impacto del DRS en dos circuitos opuestos, uno será el circuito de Gran Premio de Italia, Monza, uno de los circuitos más rápidos de la competición, y el circuito del Gran Premio de Mónaco con su mismo nombre, que es en contraposición, uno de los más lentos.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. GLOSARIO	5
2. PREFACIO	7
2.1. Origen del proyecto y motivación	8
2.2. Requerimientos previos.....	8
3. INTRODUCCIÓN	11
3.1. Objetivos del proyecto.....	11
3.2. Alcance del proyecto	12
3.3. Metodología.....	12
4. PRINCIPIOS BÁSICOS DE DINÁMICA DE FLUIDOS	15
4.1. El número de Reynolds y los tipos de flujo.....	15
4.2. La capa límite.	16
4.3. Ecuaciones.....	18
4.3.1. Ecuación de continuidad	18
4.3.2. Principio o ecuación de Bernoulli	19
4.3.3. Coeficientes y fuerzas de sustentación y resistencia al avance	20
4.3.4. Método de cálculo del programa CFX.....	23
5. EL ALERÓN TRASERO. SUS PARTES Y FUNCIONAMIENTO.	25
5.1. El spoiler trasero, el antecedente del alerón.	25
5.2. El alerón.	26
5.2.1. Tipos de alerones.....	27
5.2.1.1. Alerones de un solo elemento	27
5.2.1.2. Alerones de dos elementos	28
5.2.1.3. Alerones de múltiples elementos.....	29
6. EL DRS Y SU FUNCIONAMIENTO	31
6.1. Mecanismos de activación y desactivación del DRS.	33
6.1.1. Mecanismo <i>Push up</i>	33
6.1.2. Mecanismo Pods & Rockers.....	33
6.1.3. Mecanismo <i>Pod Pull</i>	35

7. SIMULACIÓN DE LOS ALERONES.	36
7.1. Simulación del plano principal	36
7.1.1. Elección del perfil aerodinámico del plano principal.	36
7.1.2. Simulación del perfil GOE 446	38
7.1.2.1. Geometría y mallado.	38
7.1.2.2. Set up o configuración.....	40
7.1.2.3. Solución y post-proceso	42
7.2. Simulación del alerón completo.	46
7.2.1. Elección del flap externo y diseño del alerón.	46
7.2.2. Mallado y configuración.	48
7.2.3. Post-proceso y análisis de resultados	50
8. COMPARATIVA DE CIRCUITOS	56
9. IMPACTO AMBIENTAL	59
10. CONCLUSIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	63
Referencias bibliográficas	63
Bibliografía complementaria	66

1. Glosario

Aerodinámica: Rama de la mecánica de fluidos que trata del movimiento del aire y de otros fluidos gaseosos, y de las fuerzas que actúan sobre los cuerpos cuando se trasladan en el seno de tales fluidos o cuando dichos fluidos se mueven contra o alrededor de los cuerpos

Alerones: Elementos situados en la parte delantera y trasera del vehículo destinados a interaccionar con el aire que circula alrededor del vehículo con la finalidad de proporcionar carga aerodinámica mejorando así las prestaciones del coche.

Área frontal: Se denomina así a la superficie del monoplaça que se ve desde delante y es la que se usa para calcular la fuerza de resistencia al avance del vehículo.

Capa límite: se denomina así a la zona donde el movimiento de un fluido es perturbado por la interacción con un sólido. Se usa para estudiar la interacción del sólido con el fluido tanto como la como sus consecuencias ya que en ella se concentran la mayoría de los gradientes de velocidad, temperatura, fuerzas, etc. que intervienen en dicha interacción.

Carga aerodinámica: capacidad de un cuerpo de generar una fuerza de sustentación negativa o como *downforce* que viene del inglés y significa fuerza hacia abajo.

Coeficiente de resistencia al avance, C_D : número que indica la resistencia que opone un cuerpo a avanzar a través de un fluido en función de su forma. Este número se emplea para el cálculo de la fuerza de resistencia al avance.

Coeficiente de sustentación, C_L : número que indica la capacidad de un cuerpo al ser rodeado por un fluido de crear una fuerza perpendicular a la dirección de avance de este. En el caso de los aviones se trata de un coeficiente positivo, en el caso de los alerones de un vehículo de fórmula uno, su función es "empujar" el vehículo hacia el suelo, por lo que dicho coeficiente será negativo. Muchas veces cuando hablamos de alerones, *downforce* o carga aerodinámica se habla de este coeficiente como un número positivo pero se da a entender por el contexto que indica que el vehículo es empujado hacia el suelo.

Downforce: Fuerza de sustentación negativa.

DRS (DragReductionSystem): En español sistema de reducción de la fuerza de avance. Es un mecanismo que tiene como principal protagonista el flap del alerón trasero de un fórmula 1 aunque también se puede encontrar en otro tipo de vehículos. Su funcionamiento consiste en cambiar la inclinación de dicho flap mediante un dispositivo hidráulico o eléctrico con el objetivo de reducir la resistencia al avance que opone el monoplaça. Este dispositivo se usa principalmente en rectas donde no se necesita tanta carga aerodinámica

obteniéndose así una mayor velocidad.

Eficiencia aerodinámica: a lo largo de esta memoria nos referiremos a este concepto como al cociente que se obtiene tras dividir el coeficiente de sustentación y el de resistencia al avance. Al interesarnos obtener una elevada carga aerodinámica al mismo tiempo que tenemos una resistencia al avance mínima, nuestro objetivo será obtener valores de eficiencia aerodinámica lo más elevados posibles.

Flujo laminar: Régimen de desplazamiento de las partículas de un fluido en las que se mueven de manera ordenada y cuyas trayectorias forman líneas paralelas entre sí.

Flujo turbulento: Régimen de desplazamiento de las partículas de un fluido en las que se mueven de forma caótica y desordenada.

Fuerza de resistencia al avance: Fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido en dirección paralela a la velocidad de avance pero de sentido contrario.

Fuerza de sustentación : Fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido de forma perpendicular a la dirección del desplazamiento..

Línea de corriente o Streamline: Línea que es tangente en todo momento al vector velocidad de una partícula.

Mecánica de fluidos Computacional (CFD): Rama de la mecánica de fluidos que utiliza diferentes métodos matemáticos para resolver problemas de mecánica de fluidos mediante el uso de ordenadores.

Número de Reynolds: número adimensional utilizado en mecánica de fluidos que sirve para caracterizar el movimiento de un fluido.

Túnel de viento: herramienta utilizada para ayudar a estudiar el comportamiento del aire en movimiento alrededor de diferentes objetos.

2. Prefacio

El mundo de la Fórmula 1, comenzó siendo una competición donde reina la potencia, se buscaba crear grandes motores y muy potentes que se instalaban en monoplasas en cuyo diseño no era una prioridad a la hora de crear un vehículo ganador. Se trataba de una competición muy peligrosa donde se alcanzaban grandes velocidades dónde el éxito o el fracaso eran determinados por la potencia del motor, la habilidad del piloto y su capacidad de asumir riesgos calculados.

A medida que pasan los años los monoplasas se vuelven más rápidos y la competición más peligrosa. A raíz de esto cada vez se va haciendo más énfasis en el diseño del monoplasa, y se planteaban cuestiones tales como cómo hacerlo más seguro sin perjudicar su rendimiento.

Se tuvo que esperar hasta los años 60 para que los constructores empezaran a hacer más hincapié en la aerodinámica de los vehículos. En aquel entonces se intentaba ganar ventaja frente a los competidores reduciendo la resistencia al avance que ofrecía el monoplasa diseñando formas muy afiladas o construyendo el coche lo más bajo posible con el fin de reducir su área frontal.

No fue hasta pasado el ecuador de la década que apareció el primer alerón de la mano del piloto e ingeniero Jim Hall y su Chaparral 2E que podemos apreciar en la imagen a continuación.



Figura 1: Chaparral 2E de 1966

Era un primer diseño muy burdo y simple constituido de aluminio y basado en las alas de los aviones. Esta novedad causó un gran revuelo y no tardó en incorporarse en el resto de competidores de las diferentes categorías causando la necesidad de adaptar la normativa a dicha innovación.

Desde su aparición, tanto el alerón trasero como la normativa que lo acompaña ha evolucionado a un ritmo vertiginoso derivando en infinidad de formas, posiciones y configuraciones al mismo tiempo que se generaban prohibiciones y limitaciones por parte del reglamento.

El siguiente gran acontecimiento relacionado con esta parte del vehículo aparece en 2011 donde se incorpora a la competición el DRS o sistema de reducción de drag que permitía reducir la resistencia al avance del monoplace sacrificando carga aerodinámica en aquellas zonas donde se lo pudiesen permitir.

2.1. Origen del proyecto y motivación

La idea de estudiar este elemento del vehículo surge de dos motivaciones.

Por un lado la idea de poder adentrarse ligeramente en el mundo de la Fórmula 1 mediante el estudio de una de las innovaciones más grandes que ha aparecido en los últimos años de competición.

Y por otro lado, el uso de software de simulación. Estos programas, aunque sin sustituir el clásico túnel de viento, le quita mucho trabajo y ahorra millones a las empresas tanto reduciendo los costes de fabricación de maquetas para el túnel de viento como en el tiempo a invertir permitiendo un avance mucho más rápido en el mundo de la aerodinámica.

2.2. Requerimientos previos

Para su correcta elaboración y entendimiento han sido necesarios conocimientos básicos en normativa de la competición de Fórmula 1 así como nociones de mecánica de fluidos.

No hay que olvidar mencionar que ha sido necesario el uso del programa CFX de ANSYS para la realización de las simulaciones por lo que se han precisado ciertos conocimientos acerca de su funcionamiento para la elaboración de esta memoria.

Este programa forma parte de lo que se conoce como Dinámica de Fluidos Computacional o CFD según su nombre en inglés. Se podría considerar que es la rama de la mecánica de

fluidos que incorpora la novedad de los ordenadores y los programas de simulación al estudio de cualquier materia propia de la Mecánica de Fluidos tradicional.

3. Introducció

La aerodinámica es una rama de la mecánica de fluidos que trata del movimiento del aire y de otros fluidos gaseosos, y de las fuerzas que actúan sobre los cuerpos cuando se trasladan en el seno de tales fluidos o cuando dichos fluidos se mueven contra o alrededor de los cuerpos.

Dicha disciplina, ha ido cobrando cada día más importancia en lo que se considera la categoría máxima de las competiciones de automovilismo, la Fórmula 1. A día de hoy se trata de una de las piezas clave de todo monoplaza de competición en cuya investigación y desarrollo se invierten millones de euros cada año.

Una de las últimas innovaciones de la Fórmula 1 fue la introducción del DRS o Sistema de Reducción de la Resistencia al Avance (o Drag Reduction System en inglés) que consiste en un sistema que permite variar la carga aerodinámica del vehículo modificando la disposición de una de las partes que conforman el alerón posterior mientras está en funcionamiento.

A lo largo de esta memoria se analizará dicho dispositivo y se realizarán cálculos y explicaciones que permitirán un mayor conocimiento su funcionamiento. Al mismo tiempo, se proporcionarán datos numéricos y gráficos que tras su comparación y estudio posibilitarán el hacerse una idea aproximada de cómo se traduce esta innovación aerodinámica en una mejora del rendimiento del vehículo.

3.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es proporcionar información suficiente para, por un lado, hacer posible un mayor entendimiento del funcionamiento del dispositivo DRS, y por otro lado, obtener datos numéricos que tras su comparación y estudio nos permitan sacar conclusiones veraces y válidas sobre cómo afecta el DRS al rendimiento del monoplaza.

Para conseguir dicho objetivo se usará principalmente el programa CFX de ANSYS. Este programa pertenece a la rama de dinámica de fluidos computacional o CFD de su nombre en inglés. Al carecer de los datos estructurales exactos de ningún alerón actual de la fórmula 1 por razones obvias, se realizará una aproximación con diferentes perfiles aerodinámicos intentando acercarnos al máximo a la realidad. Por este mismo motivo hacer una única simulación con datos similares a los de carrera no nos garantiza unos resultados veraces por eso realizaremos múltiples simulaciones con variaciones en los parámetros y magnitudes que intervienen a fin de que las conclusiones extraídas al final sean correctas y lo más próximas a la realidad cómo sea posible.

3.2. Alcance del proyecto

El proyecto constará de una introducción que nos proporcionará conocimientos básicos de dinámica de fluidos y acerca de las partes y mecanismos implicados en el funcionamiento del DRS que facilitarán el entendimiento del resto de la memoria.

El grueso de dicho proyecto, se centra en usar una geometría aproximada de los perfiles de ala que se encuentran en el alerón trasero de un fórmula 1 y sobre los que actúa el sistema de reducción de “Drag” para simularla en diferentes condiciones y situaciones con la finalidad de obtener datos suficientes que nos lleven a unas conclusiones que resalten la gran importancia que tiene dicho sistema en el mundo de la competición.

Al no disponer de la geometría real de ningún alerón actual de la fórmula 1, se procederá a la selección de los perfiles aerodinámicos, mediante la comparación de imágenes y vídeos de los monoplazas actuales con una base de datos de los diferentes perfiles aerodinámicos básicos que existen hoy en día.

De esta forma se pretende que los resultados que se obtengan de las simulaciones sean suficientemente próximos a la realidad cómo para que se pueda apreciar hasta qué punto es importante el DRS hoy en día.

Para finalizar, aplicaremos lo obtenido en las simulaciones a los circuitos del Gran Premio de Italia (Monza) y del Gran Premio de Mónaco (Mónaco) que son uno de los circuitos más rápidos de la competición y uno de los más lentos respectivamente. De esta manera podremos, por un lado, observar la relación entre la influencia del sistema y la velocidad del monoplaza y por otro, acercarnos un poco más a lo que serían condiciones de carrera.

3.3. Metodología

En el documento se pueden distinguir dos partes. Una primera dónde se explicarán ecuaciones, relaciones de magnitudes y fórmulas necesarias para la comprensión del resto del proyecto. Y una segunda parte, que consistirá en la selección y simulación de un alerón mediante el programa CFX de ANSYS.

Dentro del trabajo de simulación podemos distinguir las siguientes etapas que se explicarán más adelante en detalle:

- Confección de la geometría dentro del programa
- Realización de un mallado que consistirá en dividir la geometría en partes más pequeñas para después realizar los cálculos en cada una de ellas
- Selección de las condiciones de contorno en las que se realizará la simulación
- Simulación de la geometría seleccionada
- Análisis de resultados

4. Principios básicos de dinámica de fluidos

A continuación explicaremos diferentes conceptos, elementos y ecuaciones que son necesarios entender antes de continuar.

4.1. El número de Reynolds y los tipos de flujo

Un número adimensional, un parámetro sin unidades obtenido al operar variables que sí que las tienen pero que en su conjunto se cancelan o simplifican. Hay diferentes números adimensionales asociados a las diferentes magnitudes que intervienen en un fenómeno de flujo pero en nuestro caso nos basta con comprender el número de Reynolds. Este número relaciona las fuerzas de inercia y las de viscosidad de un fluido.

Viene definido por la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

En donde:

- ρ indica la densidad del fluido en kg/m^3
- v indica la velocidad del fluido en m/s
- L se trata de la “longitud característica” que en el caso de un tubo no es una longitud propiamente dicha sino el diámetro expresado en metros.
- μ indica la viscosidad dinámica del fluido en kg/(m*s)

Como podemos observar el número de Reynolds es proporcional a la velocidad y la longitud característica y será muy importante por su aparición cuando tratamos de capa límite.

Está directamente relacionado con el tipo de flujo. Un Reynolds pequeño va relacionado con un flujo laminar, que consiste en un movimiento ordenado del fluido, suave, sin entremezclarse con líneas de corriente paralelas que se intenta reflejar en la siguiente figura.

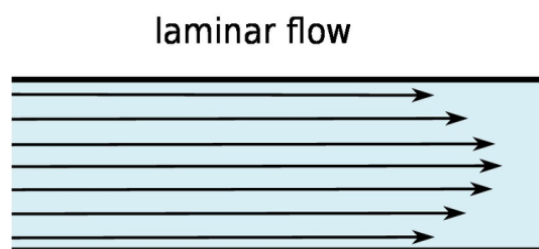


Figura 2: Líneas de corriente de un fluido laminar

Mientras que un número de Reynolds elevado se asocia con lo contrario, un flujo turbulento, caracterizado por un movimiento caótico y desordenado de las partículas como el que observamos representado en la Figura 3.

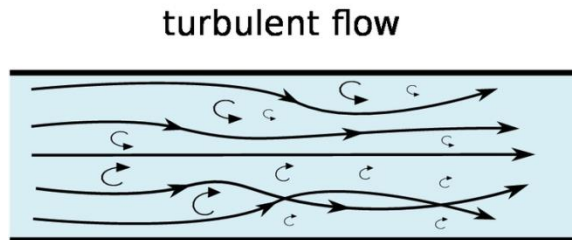


Figura 3: Líneas de corriente de un flujo turbulento

4.2. La capa límite.

La capa límite se define como aquella zona alrededor de un sólido en donde el movimiento de un fluido es perturbado por la interacción con un sólido. Se considera que abarca desde donde el fluido entra en contacto y su velocidad relativa es 0, hasta donde se alcanza el 99% de la velocidad del flujo no perturbado, tal y como se refleja en la figura 4. Se caracteriza por concentrar la gran mayoría de los gradientes de magnitudes que se producen durante dicha interacción.

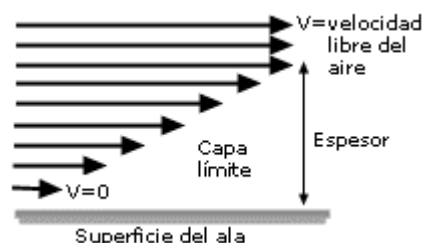


Figura 4: Esquema velocidades de la capa límite

Al igual que cualquier otro flujo, la capa límite puede ser laminar o turbulenta, pero también puede tener zonas laminares seguidas de turbulentas y zonas intermedias que poseen características de una y otra como suele ocurrir entre la zona de transición.

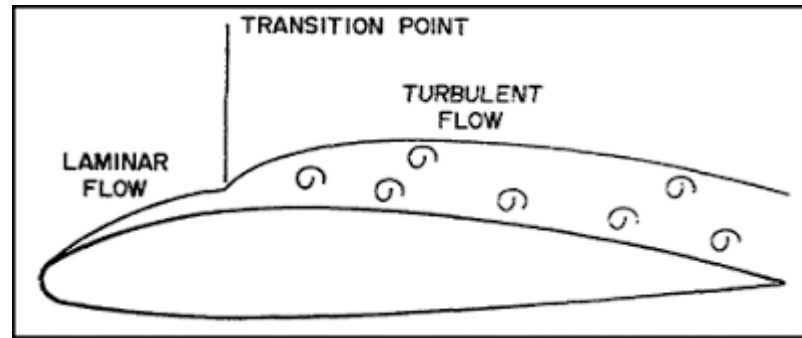


Figura 5: Capa límite en un ala

Las partículas más cercanas a la superficie del sólido, son las que sufren en mayor medida la pérdida de energía que tiene lugar al estar en contacto con el sólido con diferente velocidad relativa. En el caso de la capa límite laminar, las partículas van perdiendo energía y puede llegar a darse el caso de que esta velocidad sea nula o incluso que las partículas retrocedan, a este fenómeno se conoce como el desprendimiento de la capa límite. Aunque no una placa plana por sí misma no presenta desprendimiento, se utiliza en el esquema de la figura 6 para ejemplificar cómo evoluciona la velocidad de las partículas cuando tiene lugar este fenómeno, marcado en la figura como punto de "Flow separation" o separación del flujo.

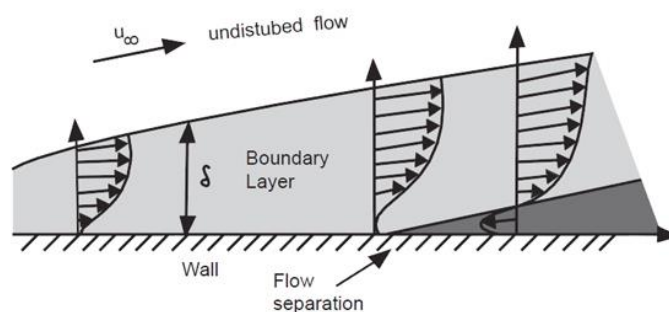


Figura 6: Desprendimiento de la capa límite

Cuando este fenómeno ocurre, el flujo deja de seguir la forma del objeto y se deja de generar sustentación perdiendo carga aerodinámica en el caso de un alerón de un vehículo o haciendo que un avión entre en pérdida.

Dependiendo de la situación nos puede interesar que la capa límite sea laminar o turbulenta. Por ejemplo, en el caso de un alerón puede interesar que haya capa límite turbulenta porque esta evita su desprendimiento cuando el alerón tiene un ángulo de ataque elevado, aunque por contrapartida también hay mayores pérdidas por fricción.

Esto se debe a que a diferencia de con la capa límite laminar, las partículas alejadas de la

superficie del sólido ceden energía al resto debido a su movimiento caótico haciendo que la pérdida neta de energía de las zonas próximas al sólido sea menor y, por tanto, capaces de evitar el desprendimiento de la capa límite durante más tiempo.

4.3. Ecuaciones

A continuación realizaremos una breve explicación de diferentes ecuaciones que intervendrán más adelante y que nos facilitarán la comprensión del resto de la memoria.

4.3.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad no es más una ecuación de conservación que se utiliza de forma diferente dependiendo del campo de la física en la que es aplicada.

La ecuación de continuidad es una ecuación de conservación de la masa que aplicaremos a fluidos incompresibles que en nuestro caso consideraremos el aire como tal a velocidades menores de 367km/h (aproximadamente 0.3 veces la velocidad del sonido o lo que es lo mismo Mach 1).

Esta ecuación nos dice que dado un volumen de control el que sea, todo el volumen que entra en durante un intervalo de tiempo ha de salir. Es decir que la cantidad de masa que alberga dicho volumen es constante en todo momento:

$$\frac{dm}{dt} = 0$$

Por ejemplo, dado el siguiente volumen de control en la figura 7:

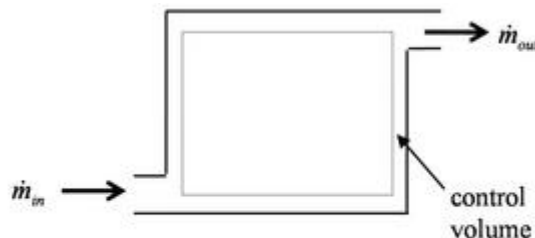


Figura 7: Volumen de control

La masa que entre en un intervalo de tiempo, \dot{m}_{in} , ha de ser igual al que sale, \dot{m}_{out} . O lo que es lo mismo si el volumen de control tiene una salida y una entrada:

$$\dot{m}_{in} = A_{in} \cdot \rho_{in} \cdot v_{in} = A_{out} \cdot \rho_{out} \cdot v_{out} = \dot{m}_{out}$$

Dónde los sufijos *in* y *out*, indican si es de entrada o de salida del volumen de control, *A* es el área por la que circula el fluido, ρ , su densidad y *v* su velocidad.

4.3.2. Principio o ecuación de Bernoulli

Daniel Bernoulli fue un físico italiano del siglo XVIII de cuyo trabajo nos interesa la relación directa que encontró entre presión y velocidad. Relación a partir de la cual surgió, de manos de un matemático (Leonhard Euler), la ecuación que hace honor a su nombre.

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constante}$$

En dónde p es la presión estática. La letra griega rho, ρ es la densidad del fluido, en nuestro caso aire y la letra v es la velocidad del flujo. El conjunto de $\frac{1}{2} \rho v^2$ es la presión dinámica.

Si la aplicamos a una línea de corriente y consideramos la densidad del fluido constante o lo que es lo mismo que se trata de un fluido incompresible también se conoce como:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \text{pérdidas}$$

Se trata de una particularización de la ecuación de la conservación de la energía que nos dice, siguiendo el orden descrito, que la presión estática más la velocidad más la altura asociada a un fluido en un punto 1, ha de ser igual a la de un segundo punto, 2, menos las pérdidas (o ganancias) debidas a la fricción, bombas u otros elementos que se encuentre en el recorrido.

En nuestro caso, nos sirve para dar una primera pincelada sobre el funcionamiento de un alerón y la generación de fuerza de sustentación. Si tenemos un ala que no sea simétrica, tenemos que las partículas que circulen por encima de ella, tendrán que hacer un recorrido más largo que las que circulan por debajo para llegar al otro lado del ala. Por eso, para llegar al otro lado las partículas que circulan por la parte superior deberán tener una velocidad mayor. Si ahora miramos la primera ecuación, deducimos que una mayor velocidad implica una menor presión y esta diferencia de presión que se crea entre las superficies del ala es la que hace que aparezca una fuerza de sustentación.

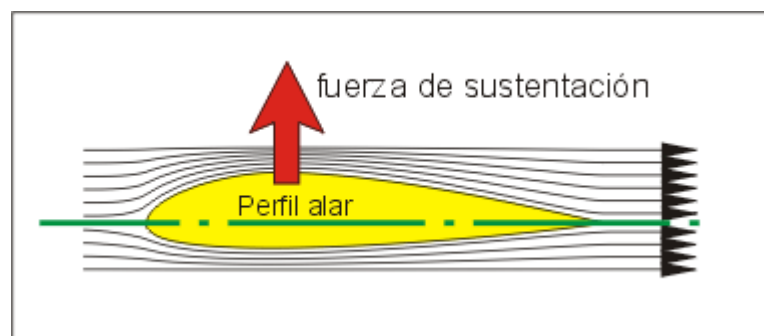


Figura 8: Líneas de corriente de un ala

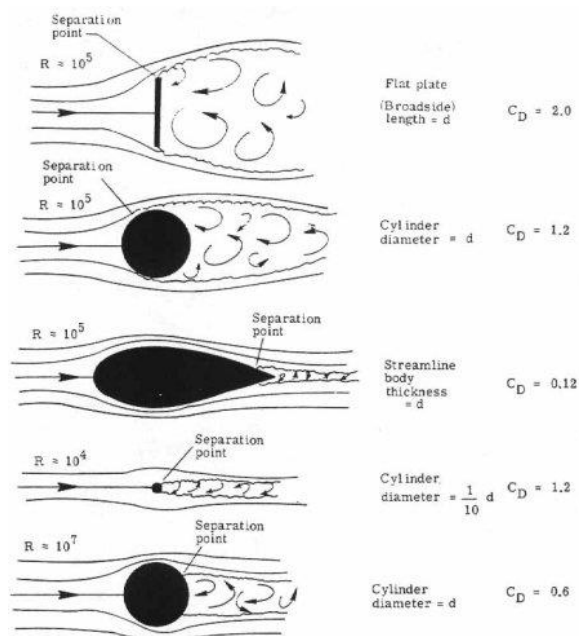
4.3.3. Coeficientes y fuerzas de sustentación y resistencia al avance

Para acabar con las fórmulas y ecuaciones hay que mencionar las relacionadas con la fuerza de sustentación y la resistencia al avance.

Por un lado tenemos el coeficiente y la fuerza de resistencia al avance o *drag* en inglés. Este coeficiente va asociado a la forma del objeto y a la cantidad de energía que se disipa cuando atraviesa un flujo.

Tal y como he mencionado, va asociado a la forma y no al tamaño como se podría pensar, por eso un cilindro de diámetro d presenta el mismo coeficiente que otro de $d/10$.

Cómo podemos observar en el último ejemplo de la *Figura 9*, si aumentamos la rugosidad de un cilindro la capa límite tarda más en desprenderse haciendo así que el coeficiente disminuya. Como dato curioso, esta propiedad es la razón por la que las pelotas de golf presentan su característica superficie con agujeros que les permite realizar lanzamientos con un alcance superior.



En el caso del alerón nos interesará que este coeficiente sea lo mínimo posible y que no haya desprendimiento de la capa límite como ya hemos mencionado antes.

Figura 9: Ejemplos de la relación de la forma con el C_D

Para fuerza de resistencia al avance de un cuerpo y su coeficiente se relacionan según la siguiente fórmula:

$$F_D = \frac{1}{2} c_D \rho A v^2$$

Dónde F_D es la fuerza, c_D su coeficiente, ρ la densidad del fluido, v la velocidad relativa entre el vehículo y el fluido y A es el área de referencia.

En el caso de los automóviles se usa como área de referencia el área frontal del vehículo que no es más que el área que se observa desde delante aunque en algunos casos se simplifica multiplicando alto por ancho del vehículo.

De la misma manera tenemos el coeficiente de sustentación, c_L , que nos indica la capacidad de generación de una fuerza perpendicular a la velocidad relativa del fluido y el objeto a la que llamaremos *lift* o fuerza de sustentación.

Este coeficiente nos permite recoger todas las complejidades geométricas y morfológicas de un elemento en un único número que nos relaciona directamente dicho elemento con su capacidad de generar fuerza de sustentación. Es de gran utilidad a la hora de estudiar diferentes objetos que por su similitud o falta de esta, requerirían de la inversión de una gran cantidad de tiempo el poder compararlos.

Podemos relacionar el coeficiente de sustentación con su fuerza correspondiente mediante la siguiente ecuación:

$$F_L = \frac{1}{2} c_L \rho A v^2$$

En esta ecuación A , hace referencia a lo que se conoce como el “área del ala” que tanto en el caso de los alerones de un automóvil, como de las alas de un avión se calcula como la envergadura multiplicado por la cuerda, partes de un ala que se puede distinguir posteriormente en la Figura 16.

Este coeficiente también determina el sentido en el que se genera la fuerza de sustentación. Es positivo cuando nos referimos a sustentación que se genera en el caso de los aviones, o negativo cuando nos referimos a carga aerodinámica como en el caso de los alerones de un fórmula 1, tal y como podemos observar en la parte inferior y superior respectivamente de la Figura 10.

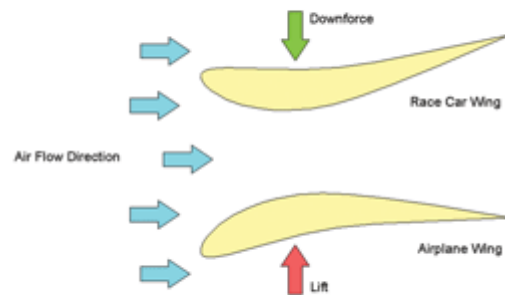


Figura 10: Esquema comparativo de un perfil de un ala y de un alerón y la fuerza de sustentación que generan

Debido a la naturaleza de este estudio, cuando tratemos los alerones mencionaremos sustentación y carga aerodinámica para referirnos a aquellas con un c_L negativo y nos referiremos expresamente en caso de no serlo mediante el término “sustentación positiva”.

Al conjunto formado por la fuerza de resistencia al avance y la fuerza de sustentación o carga aerodinámica lo denominaremos fuerza aerodinámica.

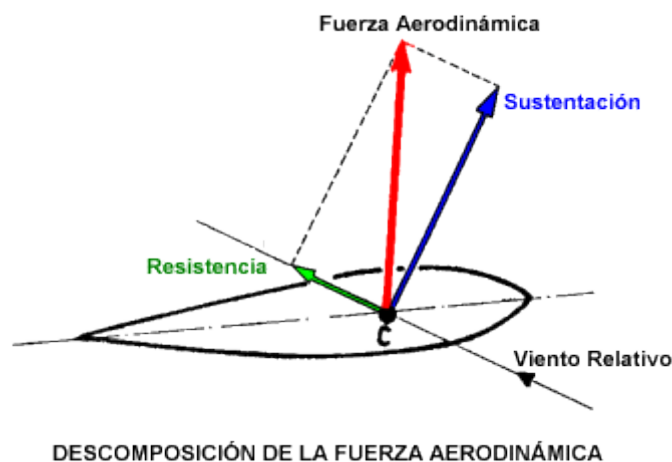


Figura 11: Esquema de las componentes que forman la fuerza aerodinámica

Tal y como hemos mencionado, el c_D y el c_L son medidas relativas y adimensionales de cuánta sustentación y resistencia puede generar un cuerpo. En un alerón de un fórmula 1, es obvio que buscaremos el mínimo c_D y el máximo c_L (con signo negativo) pero no podemos trabajar con ellos como si fueran cosas independientes buscando primero uno y

después otro, sino que se debe trabajar con ambos a la vez.

Llamaremos eficiencia aerodinámica al cociente de ambos y será este valor que buscaremos maximizar. Siendo:

$$Eficiencia\ aerodinámica = \frac{c_L}{c_D}$$

4.3.4. Método de cálculo del programa CFX

El programa CFX usa lo que se conoce como método de los elementos finitos. Se trata de un método de aproximación que usa para la resoluciones de ecuaciones diferenciales que parte de dividir la geometría en elementos más pequeños y calcular la solución exacta en los únicamente en los puntos conocidos como nodos.

En la figura 12 podemos ver que hay diferentes tipos de subdivisiones o mallados y que sitúan los nodos, que vienen representados mediante pequeñas circunferencias, de manera distinta.

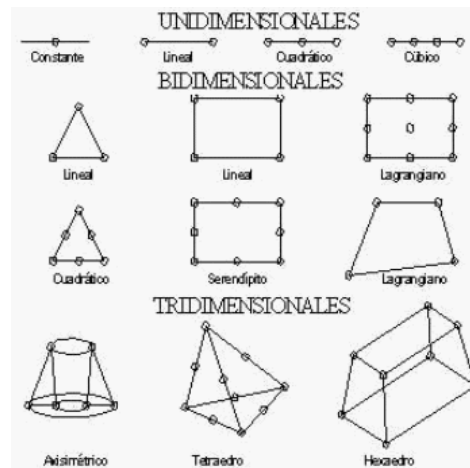


Figura 12: Diferentes tipo de mallado con su típica distribución de nodos

Para calcular los valores en coordenadas que no se corresponden con ningún nodo el programa interpola la solución según los valores nodales de alrededor.

Este software trata de resolver principalmente dos ecuaciones. La ecuación de la continuidad explicada en el apartado 4.1.3.1 y las ecuaciones de Navier – Stokes.

Navier-Stokes:

x - component:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

y - component:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

z - component:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z.$$

Figura 13: Forma diferencial en componentes cartesianas de las ecuaciones de Navier-Stokes

Son un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales que sirven para describir cualquier fenómeno que involucre fluidos newtonianos. Se pueden expresar de diferente manera, una de ellas es la que vemos en la Figura 13, donde están expresadas de forma diferencial y separadas según las coordenadas cartesianas x, y, z.

Al tratarse de ecuaciones no lineales, el programa usa el método de los elementos finitos de manera iterativa y nos permite seleccionar como mencionaremos más adelante que convergencia han de tener los valores para dar por finalizado el proceso.

A estas ecuaciones se les ha de añadir aquellas que definen el modelo turbulento. En nuestro caso, hemos elegido el modelo SST o "shear stress transfer". Este modelo combina lo mejor de otros dos. Utiliza el modelo k- ω para las zonas de capa límite y cercanas a un cuerpo, y utiliza el modelo k - ϵ en las zonas más alejadas de objetos también conocido como corriente libre o free-stream.

5. El alerón trasero. Sus partes y funcionamiento.

5.1. El spoiler trasero, el antecedente del alerón.

No es hasta los años sesenta que, debido al aumento en las velocidades máximas en los vehículos, surge una creciente preocupación sobre las fuerzas de sustentación positiva que aparecen a altas velocidades. Así fue, que en las categorías en las que competían vehículos de carrocería completa empezaron a aparecer los primeros apéndices destinados a la reducir la sustentación, los spoilers.



Figura 14: Spoiler moderno utilizado en la NASCAR

Un spoiler no es más que un apéndice situado en la parte trasera del vehículo sin espacio entre ellos. Podemos encontrar desde los más simples en forma de placa inclinada o los utilizados en competición con formas tridimensionales complejas.

La palabra spoiler, proviene del verbo en inglés “to spoil” que se traduce como estropear, arruinar. Tal y como sugiere el significado de la palabra, su propósito es estropear el flujo de aire que circula sobre la parte trasera del vehículo y causante de la pérdida de agarre en dicha zona.

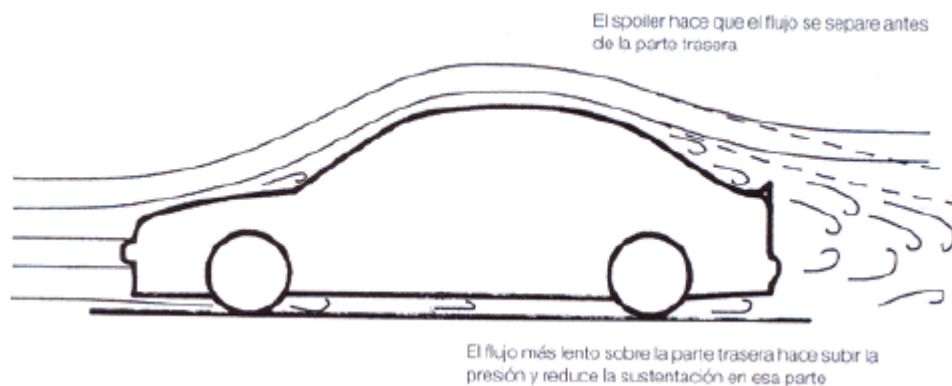


Figura 15: Funcionamiento de un spoiler

Tal y como se aprecia en la figura 15, es spoiler perturba el flujo del aire haciendo que se separe antes de la parte trasera del vehículo reduciéndose así su velocidad. Tal y como hemos mencionado con la ecuación de Bernouilli, al disminuir la velocidad la presión local en esa zona aumentará reduciéndose así la fuerza de sustentación que hacía perder agarre al vehículo y lo volvía inestable a elevadas velocidades.

A pesar de la sencillez de este elemento, aun se usa en la actualidad en diferentes competiciones. Ejemplo de ellos es el spoiler que podemos observar en la Figura 13, que se corresponde con un modelo actual que se usa en la competición de la NASCAR

5.2. El alerón.

Un alerón también considerado en ocasiones sinónimo de ala, es un cuerpo diseñado con tal forma que el aire que pasa a través de ella crea una fuerza de sustentación de algún tipo. En nuestro caso, esta fuerza de sustentación deberá ser negativa y la llamaremos carga aerodinámica. También será muy importante para nosotros, que la forma de dicho alerón no cause una resistencia al avance excesiva ya que esto sería contraproducente a la hora de competir.

Un alerón viene definido por su sección transversal o perfil y tal como se puede apreciar en la actualidad en las formas complejas que adoptas los alerones de un fórmula 1, dicha sección no tiene por qué ser la misma a lo largo de él.

En una sección del alerón podemos distinguir las diferentes partes que se pueden ver representadas en la figura 16:

- El borde de ataque o BA, se trata de la parte delantera del ala.
- El borde de fuga o BF, se encuentra en el lado opuesto al BA y es la parte trasera del alerón y, normalmente, tiene una forma estrecha.
- La cuerda o línea de cuerda, es la línea recta imaginaria que une el BA y el BF y se le hace referencia mediante la letra "c".
- El ángulo de ataque, que se define como el ángulo entre la horizontal o dirección del flujo y la cuerda del perfil.
- El grosor se define como la distancia vertical entre la superficie superior e inferior del perfil. La posición del grosor máximo posición se mide relativa a la cuerda ya sea como porcentaje o fracción decimal.

- Línea media o línea de curvatura, se define como la línea que pasa por los infinitos puntos medios de un ala desde BA hasta BF
- La curvatura se mide como la distancia vertical que separa la línea de curvatura de la línea media. Su posición se da de la misma manera que la del grosor máximo, de forma relativa a la cuerda.
- El ancho de un alerón es conocido como su envergadura. Y a la relación que existe entre la envergadura y la cuerda de un alerón se le llama relación de aspecto.
- Aunque no es una parte de un ala propiamente dicho, es una característica que se tiene en cuenta a la hora de diseñar o elegir un ala. Hablamos de la relación de aspecto. Este parámetro relaciona la envergadura con la cuerda del ala en forma del cociente que se puede encontrar en la parte inferior de la figura. Esta característica adopta valores muy elevados en geometrías alares propias de los aviones y mucho menores en las que son propias de un automóvil.

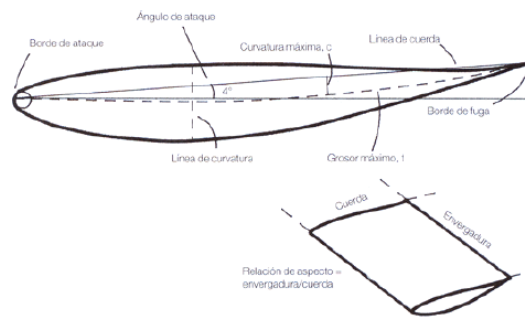


Figura 16: Partes de un perfil alar

5.2.1. Tipos de alerones

Según la morfología de un alerón podemos diferenciar diferentes tipos de alerones.

5.2.1.1. Alerones de un solo elemento

Tal y como indica su nombre se caracterizan por ser constituidos por una sola pieza. Se podría decirse que se trata de spoilers separados de la resto del vehículo.

Para que estos alerones generen carga aerodinámica han de tener una curvatura o un ángulo de ataque diferentes de 0 o ambos.

Gracias a la sencillez de estos perfiles se pueden hacer algunas generalizaciones sobre cómo afectan algunos aspectos geométricos del perfil a su rendimiento.

Por ejemplo, tal y como observamos en el gráfico 1, los perfiles más gruesos tienden a tener una pérdida de coeficiente de sustentación menos abrupta que los perfiles más finos.

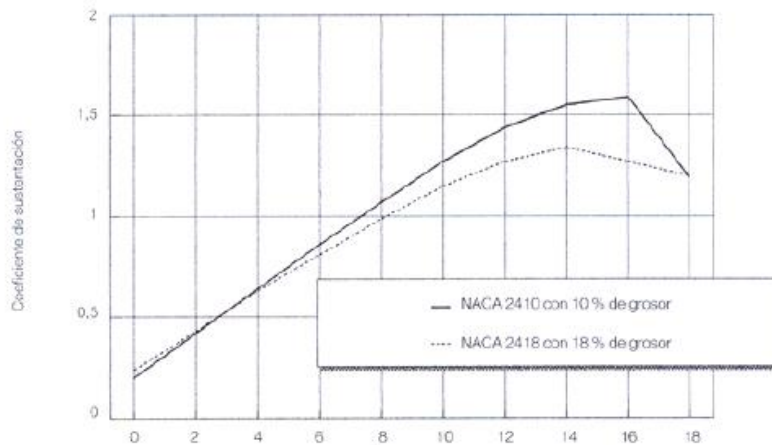


Gráfico 1: Efecto del grosor en el coeficiente de sustentación

La curvatura nos permite aumentar el valor del coeficiente de sustentación (en módulo) para un determinado ángulo de ataque. Por lo general, una curvatura cuyo máximo se encuentra en la mitad posterior de la cuerda, tiende a crear una mayor carga aerodinámica, aunque configuraciones donde la curvatura máxima se encuentra en la mitad anterior puede ser de mayor utilidad en situaciones de baja resistencia y con un ángulo de ataque bajo.

Cómo hemos comentado, los cambios en la geometría del perfil pueden afectar de manera diferente en diferentes situaciones, pero la manera más fácil de modificar las características de un alerón es mediante un flap extra.

5.2.1.2. Alerones de dos elementos

Con un alerón formado por un único elemento podemos obtener hasta cierto valor de carga aerodinámica jugando con los valores de curvatura y grosor del alerón. Pero en el caso de necesitar una mayor carga aerodinámica y podemos tolerar el consiguiente aumento de la resistencia al avance, el siguiente modelo más simple es el de dos elementos.

Existen dos geometrías para este alerón, aquella conformada por un plano principal y un flap externo, figura 18, y aquella la que presenta un flap Fowler o de Ranura, figura 19.



Figura 17: Alerón de dos elementos con flap externo

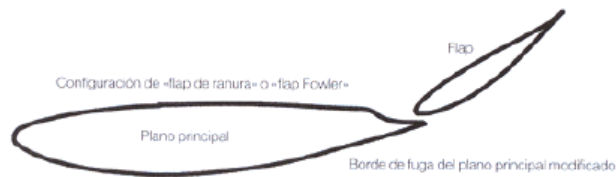


Figura 18: Alerón de dos elementos con flap tipo Fowler

La geometría con flap de ranura es más compleja y por tanto más difícil de confeccionar y aunque existan algunos estudios que obtienen mejoras con la configuración de flap Fowler, existe una mayor tendencia a usar la de flap externo.

Aunque hoy en día las configuraciones de los fórmula 1 son más complejas que un plano principal simple y un flap que se adecue, se podría decir que la configuración de flap externo es la que más se asemeja a la que se usa hoy en día con el sistema DRS implementado.

5.2.1.3. Alerones de múltiples elementos.

También cabe mencionar que existen alerones con formados por múltiples elementos, como pueden ser los de 3 elementos (figura 20), de 3 elementos con aleta en su borde de ataque (figura 21 derecha) y de 4 elementos (figura 22 izquierda) pero no entraremos en su estudio ya que es más complejo sacar conclusiones genéricas sobre su funcionamiento y no se usan actualmente en el mundo de la fórmula 1.



Figura 19: Alerón de 3 elementos

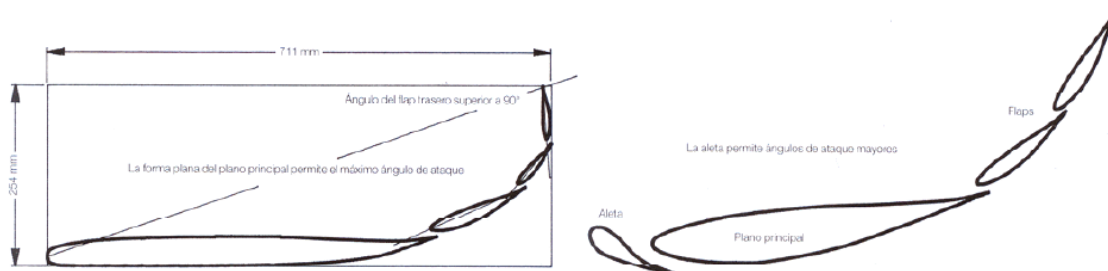


Figura 20: Dos configuraciones diferentes de alerones de múltiples elementos

6. El DRS y su funcionamiento

El DRS o sistema de reducción de drag (Drag Reduction System en inglés), es un elemento que aparece en la Fórmula 1 en el año 2011 con la finalidad de facilitar los adelantamientos y hacer la competición más entretenida.

Este sistema consiste en que el flap externo del alerón trasero sea móvil y se pueda modificar su ángulo de ataque mediante la carrera. El objetivo de este sistema es reducir la resistencia al avance aumentando así la velocidad del vehículo en zonas como rectas o curvas muy abiertas donde no sea necesaria toda la carga aerodinámica que proporciona el alerón trasero.



Figura 21: Un Fórmula 1 con el DRS apagado (izquierda) y activado (derecha)

Como podemos ver en la figuras 22, el flap externo pasa de seguir la curvatura del plano principal a reducir su ángulo de ataque significativamente. Con esto se consigue que tanto la carga aerodinámica como la resistencia al avance que se está generando con el DRS desactivado, sean mínimas una vez que lo activamos. De esta manera podemos aumentar significativamente la velocidad del monoplaza pero puede ser muy peligroso si no se usa correctamente ya que también reducimos la sustentación negativa del mismo.

Debido al gran impacto que puede tener este dispositivo su uso está muy regulado por la Federación Internacional de Automovilismo o FIA:

- El DRS sólo se podrá usar en las zonas especificadas en cada circuito que son dos o una en caso de algunos circuitos pequeños como el de Mónaco.
- Al ser su finalidad la de facilitar los adelantamientos, sólo se podrá utilizar cuando al pasar por la zona de detección previa a la zona de DRS se esté a menos de un segundo del coche de delante.

- En el caso de los entrenamientos y la calificación los pilotos serán libres de activarlo siempre y cuando estén dentro de la zona de DRS. Si durante la clasificación se restringe su uso, esta restricción se mantendrá hasta su conclusión.
- En cualquier momento el director de carrera puede restringir el uso del DRS debido a condiciones meteorológicas o por haber bandera amarilla en la zona de uso del DRS.
- El DRS permanecerá desactivado durante las dos primeras vueltas de la carrera y también lo estará dos vueltas cuando abandone la pista un coche de seguridad.
- El DRS se desactivará automáticamente devolviendo el flap externo a la posición original la primera vez que el piloto pise el freno tras la activación del sistema de reducción de drag.



El encargado de activar y desactivar el sistema es el piloto y lo hace mediante un dispositivo instalado generalmente en el volante como podemos ver en la figura 24, aunque hay escuderías que utilizan un sistema accionado por un pedal situado en el interior del monoplaza.

Figura 22: Volante con los dispositivos de activación del DRS (derecha) y el KERS (izquierda)

6.1. Mecanismos de activación y desactivación del DRS.

Existen tres mecanismos diferentes a elegir por la escudería que sirven para activar y desactivar el DRS.

6.1.1. Mecanismo *Push up*

Cuando se introdujo esta novedad en la Fórmula 1, muchas escuderías aun usaban un pilón o poste para ayudar a sujetar la parte superior del alerón. De lo que surgió el mecanismo *Push up* que aprovecha dicha estructura para que albergue el actuador hidráulico encargado de empujar el flap desde su parte inferior hacia arriba activando así el DRS.

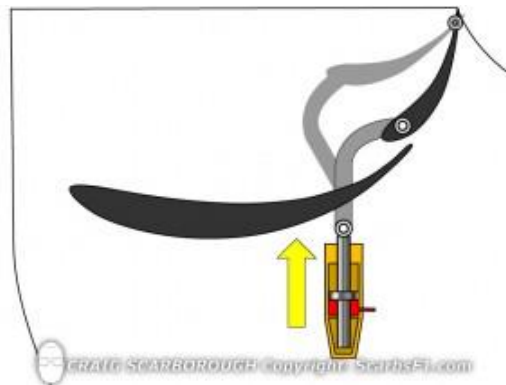


Figura 23: Esquema del mecanismo *Push up*



Figura 24: Mecanismo *Push up*

6.1.2. Mecanismo *Pods & Rockers*

Pero la desaparición del pilón para el soporte del alerón y algunos problemas que daba al interferir con la aerodinámica del vehículo hizo a las escuderías desarrollar otros sistemas. La principal alternativa fue un mecanismo que se conoce como *Pods & Rockers* aunque hubo algunas escuderías como la Red Bull que usaron este mecanismo desde la introducción del DRS.

Este sistema consiste en la instalación de un actuador hidráulico horizontal sobre el plano principal del alerón. Aunque sistema presentaba dificultades añadidas como el llevar el circuito hidráulico hasta el actuador o la necesidad de instalar elementos extras para la conexión entre el actuador y el flap, el cómputo global suponía una mejor aerodinámica respecto al sistema *Push up*.

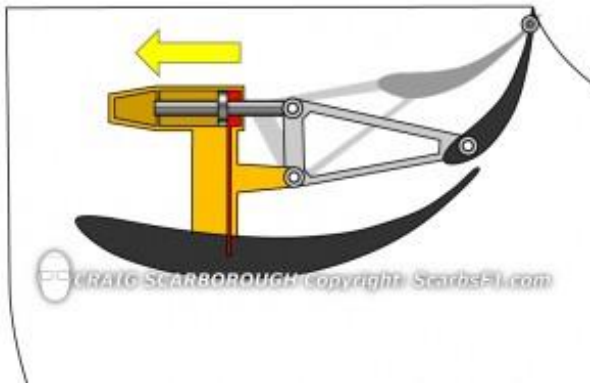


Figura 25: Mecanismo Pods & Rockers



Figura 26: Mecanismo Pods & Rockers

A pesar de que el sistema de unión entre el actuador y el alerón sea mayor en tamaño, su posición sobre el plano vertical y un mejor diseño aerodinámico hace que interfiera mucho menos con el alerón que el sistema *Push up*. Además este sistema es más rápido a la hora de activar y desactivar el DRS.

En la actualidad la mayoría de las escuderías no usan ninguna de estas opciones sino que usan una tercera que se considera la evolución del *Pods & Rockers* que ya hemos mencionado.

6.1.3. Mecanismo *Pod Pull*

Es una versión más simple del *Pods & Rockers* que llamaremos mecanismo *Pod Pull* que reduce el tamaño de las partes implicadas reduciendo así aun más su interferencia en el funcionamiento del alerón. El único inconveniente del mecanismo es que requiere un mayor esfuerzo hidráulico para obtener la misma velocidad de activación del DRS que el *Pod & Rockers*. Esto no supone un problema debido a que el vehículo ya usa sistemas hidráulicos de presión elevada en otros mecanismos.

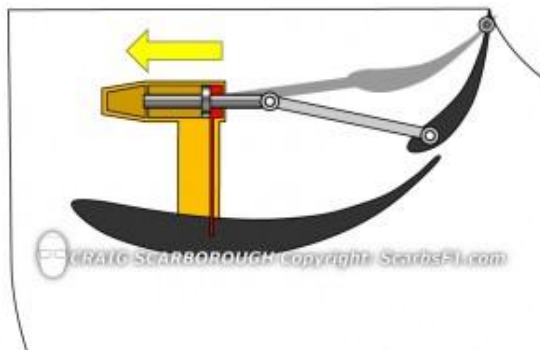


Figura 27: Esquema del mecanismo Pod Pull



Figura 28: Mecanismo Pod Pull

7. Simulación de los alerones.

A continuación se agruparán todas las simulaciones que se han hecho ya por ser necesarias o como herramienta para contrastar información.

7.1. Simulación del plano principal

7.1.1. Elección del perfil aerodinámico del plano principal.

Tal y como hemos mencionado anteriormente, la selección de los perfiles se empezó a hacer comparando una base de datos con imágenes de los perfiles con imágenes reales de los monoplazas de Fórmula 1. Los alerones actuales de la competición, son muy diferentes a los perfiles básicos con muchas modificaciones respecto a estos lo que hace muy complicado realizar la selección simplemente a partir de la inspección de material visual.

Debido a este motivo, se optó por limitar la selección a los 4 perfiles que veremos a continuación que se sabe que han sido utilizados alguna vez en la Fórmula 1 ya sea como plano principal del alerón o como flap.

Dentro de la base de datos consultada, tenemos diferentes grupos de perfiles entre los que elegir. Por un lado tenemos los NACA. Estos fueron los primeros perfiles en aparecer pero que ya están en desuso en el ámbito de la Fórmula 1.

Si nos centramos en los que están en uso en la actualidad, a pesar de ser muy diferentes como hemos mencionado anteriormente, nos encontramos con que los perfiles GOE, los B y los FCX son los perfiles básicos de los que se parte en muchos casos a la hora de diseñar.

Dentro de cada grupo encontramos una gran cantidad de perfiles y al no encontrar una diferencia sustancial que nos indique que unos son más válidos que los otros y se han utilizados varios perfiles de diferentes tipos a lo largo de los años en la competición, nos hemos ceñido a discernir únicamente entre los cuatro perfiles del grupo GOE que observamos a continuación.

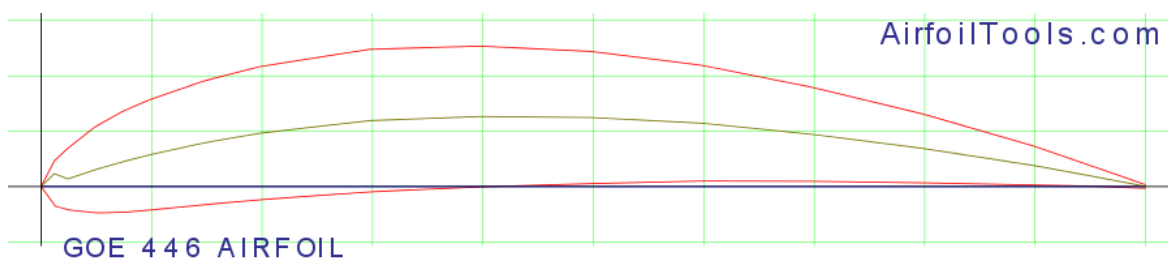


Figura 29: Perfil GOE 446

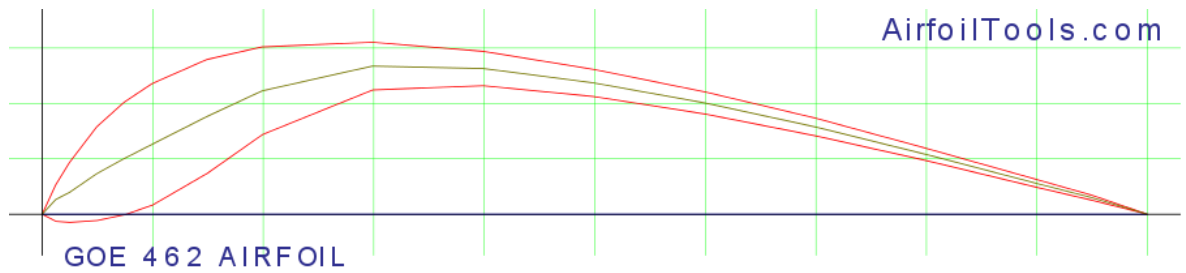


Figura 30: Perfil GOE 462

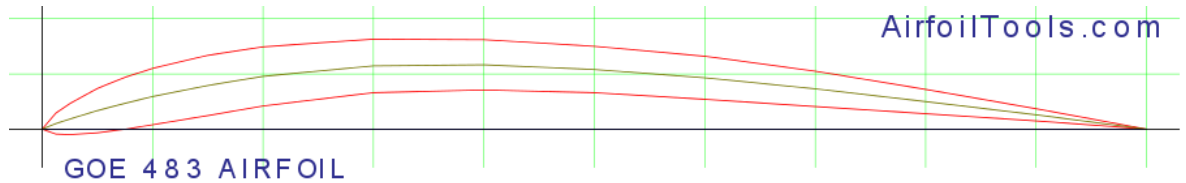


Figura 31: Perfil GOE 483

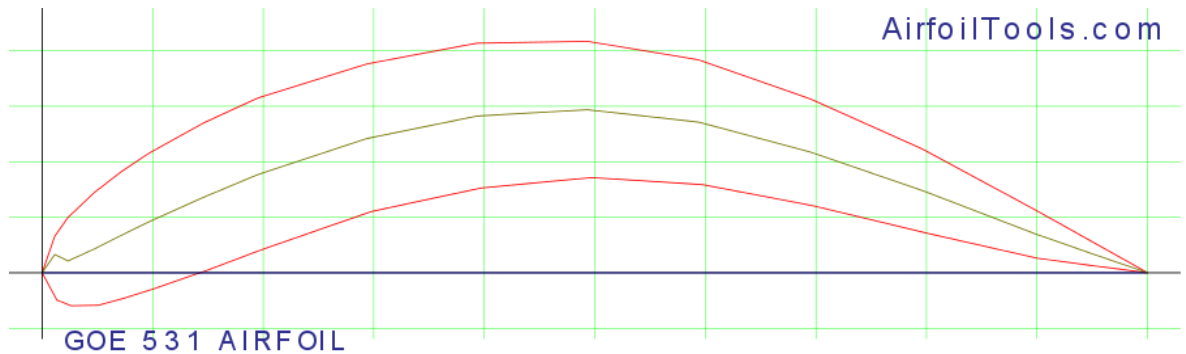


Figura 32: Perfil GOE 531

La primera caracterización que haremos es decidir qué perfiles son mejores para el diseño del plano principal y cuales son mejores para el flap.

Hemos considerado que los perfiles GOE 446 ,figura 31, y GOE 483, figura 33, son propios de los planos principales, mientras que los restantes propios del flap por los siguientes motivos.

Primero de todo, el plano principal se caracteriza por estar fijo y no ser móvil por lo que se requiere que los perfiles tengan una relación Lift/Drag lo mayor posible ya que va a estar interaccionando con el rendimiento del monoplaza de forma permanente.

Segundo y por los mismos motivos que en el primer criterio, el coeficiente de Drag debe de ser lo menor posible para minimizar el resistencia al avance del monoplaza.

Y tercer criterio y último, aprovechando toda el material fotográfico y de vídeo utilizado anteriormente, se tendrá en cuenta si similitud en la medida de lo posible con la realidad.

Finalmente estas son las características que nos han hecho elegir el perfil para el plano principal:

- Los perfiles GOE 446 y GOE 483 generan aproximadamente la mitad de resistencia al avance que los GOE 462 y GOE 531
- Los perfiles GOE 446 y GOE 483 tienen una eficiencia o relación Drag/Lift entre un 35% y un 50% mayor que los GOE 462 y GOE 531
- Los perfiles GOE 446 y GOE 483 se asemejan más al material multimedia inspeccionado.

Por último, se ha elegido el perfil GOE 446 sobre el GOE 483 por el motivo de ser ligeramente superior en la generación de fuerza de downforce sin añadir resistencia al avance adicional tanto a los 270 km/h de la simulación como velocidades inferiores.

7.1.2. Simulación del perfil GOE 446

Gracias a la información recogida en la base de datos sabemos que a la velocidad de 270km/h, que coincide con la velocidad a la que se abre el DRS en el tramo más lento de circuito del Monza, el ángulo de ataque óptimo del plano principal es próximo a los 2°. Se ha elegido esta velocidad por ser algo intermedio entre los dos circuitos y dar una configuración más o menos útil en ambos circuitos.

7.1.2.1. Geometría y mallado.

Debido a las limitaciones que tiene el software para estudiantes ANSYS CFX, en vez de simular el alerón con su envergadura completa, se opta por una simulación de 0,1 mm de espesor, dato que se tendrá en cuenta a la hora de realizar los cálculos.

Se ha optado por este espesor tan reducido por dos motivos. Por un lado, nos permite tener un mallado más fino sin que se disparen el número de nodos y por tanto el tiempo de simulación. Y por otro lado, dicho espesor junto con la condición de simetría que se explicará en la configuración, nos permite que la simulación no sea más próxima a la realidad.

El dimensionamiento de la caja de que envuelve el perfil, se ha decidido seleccionado tras múltiples simulaciones, haciéndola tan pequeña como sea posible pero sin que esta interfiera negativamente con los resultados de la simulación.

En resumen, tal y como podemos ver en la figura 35, nos encontramos con el perfil GOE 446 de longitud de cuerda de 200mm y ángulo de ataque de 2° centrado en un prisma

rectangular de 350mm X 200mm X 0,1mm.

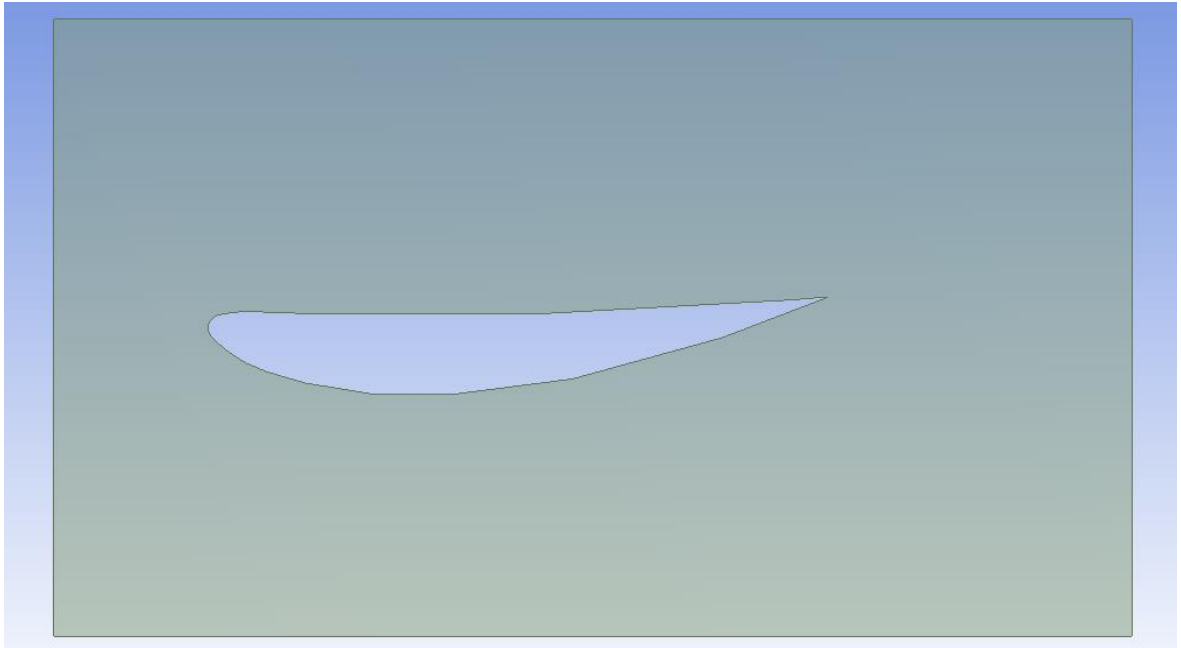


Figura 33: Geometría del plano principal a analizar

Cómo hemos mencionado antes, el programa nos limita a través del número de elementos que nos permite simular. Teniendo esto muy en cuenta, se ha procedido a realizar un mallado con las siguientes características:

- "*Inflation*": se ha utilizado esta herramienta que nos permite realizar un mallado más fino en las zonas que nos interesa que se agrandando gradualmente a medida que nos alejamos de ellas. En nuestro caso, la hemos usado para tener un mallado más fino en la superficie del perfil que es donde se concentraran la mayoría de gradientes y magnitudes debido a la capa límite.
- "*Sizing*": esta herramienta nos permite dimensionar el mallado de los elementos limitándolo de diferentes maneras como pueden ser, imponiendo un tamaño o un número de divisiones. En nuestro caso la hemos utilizado en la superficie que correspondería con el alerón para así imponer un mallado aun más preciso en las zonas más cercanas al perfil.

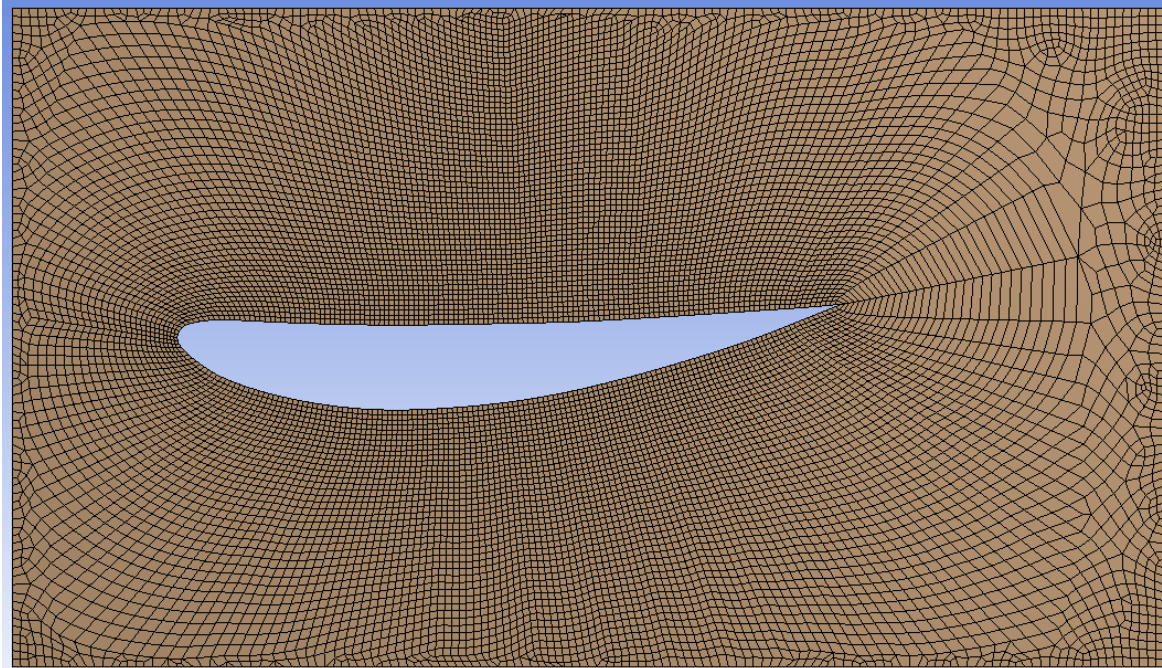


Figura 34: Mallado de la geometría del plano principal

Como se puede observar en la figura 36, se trata de un mallado muy fino en la zona cercana al perfil y que va aumentando en tamaño a medida que nos alejamos de él. Presenta únicamente una zona ligeramente más distorsionada en la zona del borde de fuga del perfil pero que tras analizar los resultados de varias simulaciones con diferentes mallados se ha llegado a la conclusión de que tiene una repercusión mínima y que una mejora complica demasiado el modelo comparados con las diferencia de resultados obtenidos.

Al tratarse de una geometría relativamente sencilla, nos han bastado estas dos herramientas para garantizar un mallado suficientemente fino para obtener resultados correctos y no necesitar de un tiempo de simulación excesivamente largo.

7.1.2.2. Set up o configuración

Esta parte del proceso, consiste en asignar a cada parte de la geometría diseñada unas determinadas características que permitirán al programa realizar la simulación que se desea generando así datos válidos.

- "*Inlet*" o entrada: esta característica nos sirve para situar la "entrada" de flujo a la geometría y determinar sus características. En nuestro caso, consideraremos la entrada de flujo hacia el borde de ataque de nuestro alerón y se tratará de aire a 270 km/h en la dirección del eje X positivo.
- "*Outlet*" o salida: en contraposición del *inlet*, el *outlet* nos permite determinar por donde saldrá el flujo y con qué características, en nuestro caso será la cara opuesta al *inlet* con una presión relativa nula

- "*Opening*" u obertura: esta herramienta se utiliza en aquellas superficies a través de las cuales el fluido puede tanto entrar como salir. En nuestro caso, no se utilizará ya que con las otras opciones podemos caracterizar todas las superficies.
- "*Wall*" o pared: con esta herramienta caracterizamos a todas aquellas superficies que vayan a interaccionar como sólidos con el flujo. En nuestro caso, la aplicaremos tanto al perfil como a las superficies superior e inferior de la geometría, en este segundo caso para asemejarnos a cómo sería en un túnel de viento.
- "*Symmetry*" o simetría: esta herramienta se puede utilizar de diferentes maneras, nosotros la utilizaremos en las superficies perpendiculares a la envergadura del perfil y nos servirá para crear, a ojos del programa, un objeto infinito en la dimensión Z de manera que no influirá dicha dimensión en el análisis.

En este apartado también se nos permite definir otras características y condiciones de necesarias en la simulación:

- Tipo de simulación: se nos permite elegir entre una simulación en régimen estacionario o transitorio, en nuestro caso, elegiremos la primera opción
- Modelo turbulento: de entre los diferentes modelos que existen y se nos deja elegir, nosotros elegiremos el SST o *Shear Stress Transfer* que recoge lo mejor de los modelos $k-\varepsilon$ y $k-\omega$
- Fórmulas y variables adicionales: el programa tiene una opción dentro de "*Output control*" que nos permite seleccionar de que variables en concreto queremos recibir información una vez realizado el "*Solution*" que es el siguiente paso. Nosotros hemos implementado las formulas de los coeficientes tanto de resistencia al avance como de sustentación como veremos posteriormente al final de la simulación.
- Cómo hemos mencionado anteriormente, el programa realizará un proceso iterativo para la resolución de las ecuaciones implicadas en la simulación. En este apartado podemos imponer cuando se detiene el programa y deja de hacer iteraciones. Por un lado pondremos un número máximo de iteraciones de 500, se trata de un valor muy elevado ya que nuestro objetivo no es que el programa llegue a este número de iteraciones sino a una determinada precisión. Esta precisión se mide mediante la convergencia de los valores obtenidos calculados usando la media cuadrática o RMS. Nos conformaremos cuando los valores RMS sean inferiores a 1×10^{-5} .

Como podemos observar en la siguiente figura, hemos cumplido uno de nuestros objetivos que era el de que la simulación acabase por haber obtenido la precisión deseada y no por haber alcanzado el máximo de iteraciones. La simulación se ha detenido pasadas las 120 iteraciones cuando todos los residuos han sido iguales o inferiores a 1×10^{-5} .

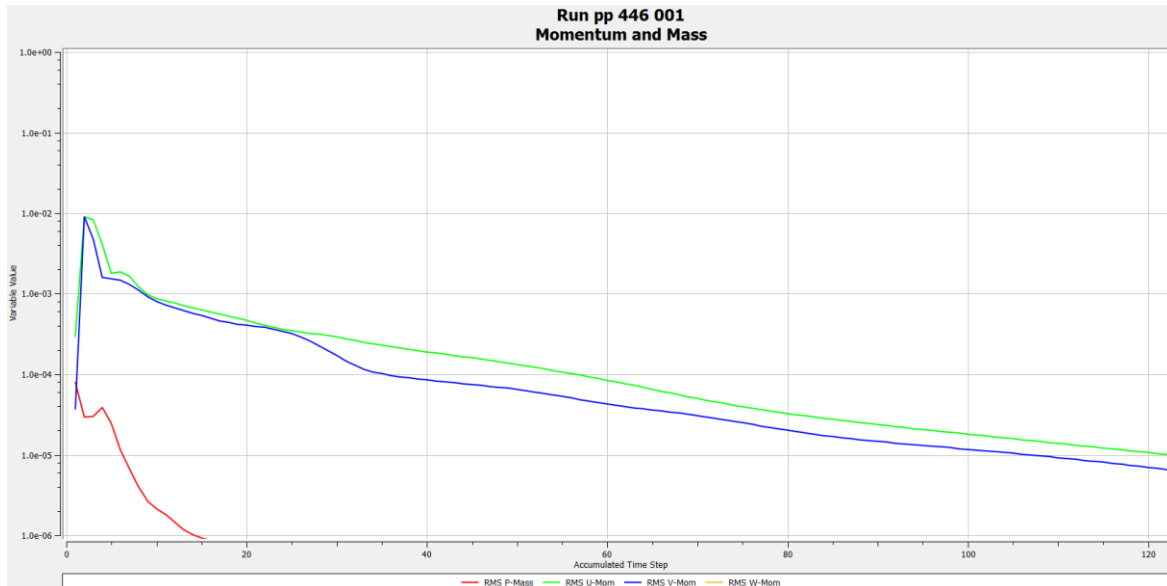


Figura 35: Residuos obtenidos tras la simulación del plano principal

Como se puede observar en la figura 37, al aumentar la precisión estándar en la el valor límite de los residuos esta en 1×10^{-4} , hemos conseguido duplicar el número de iteraciones que realiza el programa aumentando así la precisión de los resultados.

7.1.2.3. Solución y post-proceso

Una vez alcanzado este paso, se da la simulación por finalizada y se procede a obtener gráficas, imágenes y otros datos en función de lo deseado.

Al ser la primera simulación, empezaremos por analizar los gráficos que puedan demostrar que el alerón funciona como esperábamos y analizar su comportamiento.

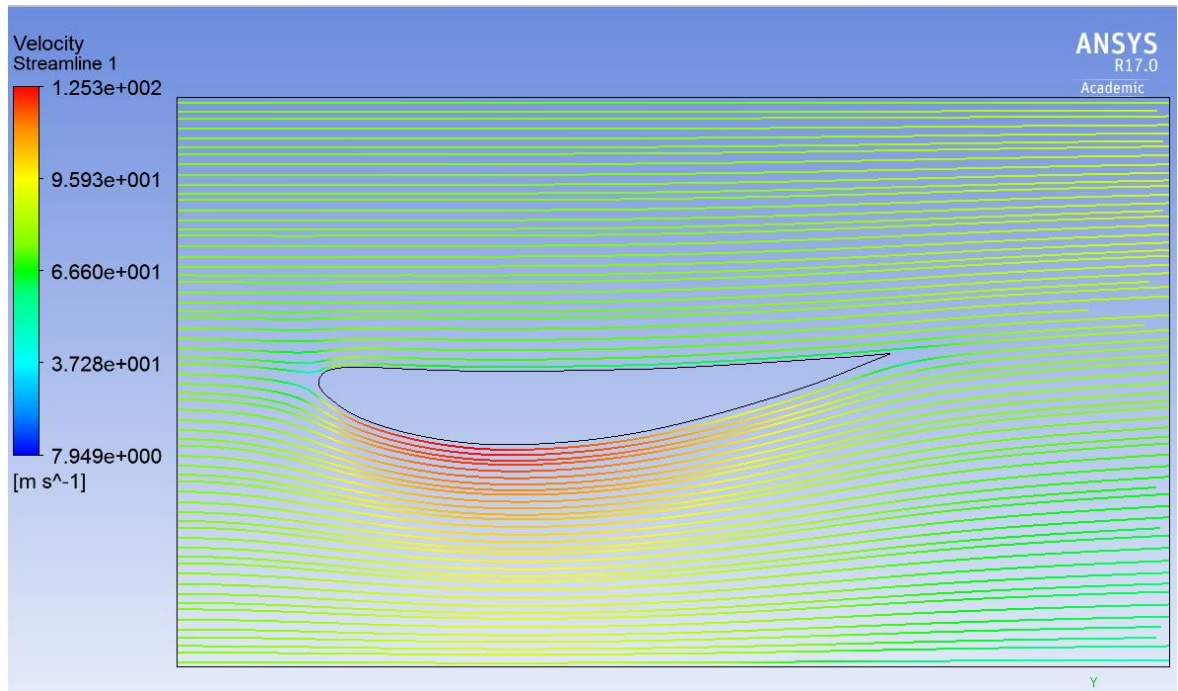


Figura 36: Streamlines con leyenda cromática según la velocidad

Tal y como podemos ver en la figura anterior, el flujo se separa al llegar al alerón y manifestando la validez de la ecuación de continuidad, el flujo que lo recorre por la parte inferior se ve obligado a aumentar su velocidad al tener que recorrer un mayor distancia. De esta manera observamos como las líneas tienen un color rojizo en la parte inferior mientras que en la parte superior, debido a que es prácticamente plano, las líneas de corriente o streamlines alcanzan únicamente colores verdosos.

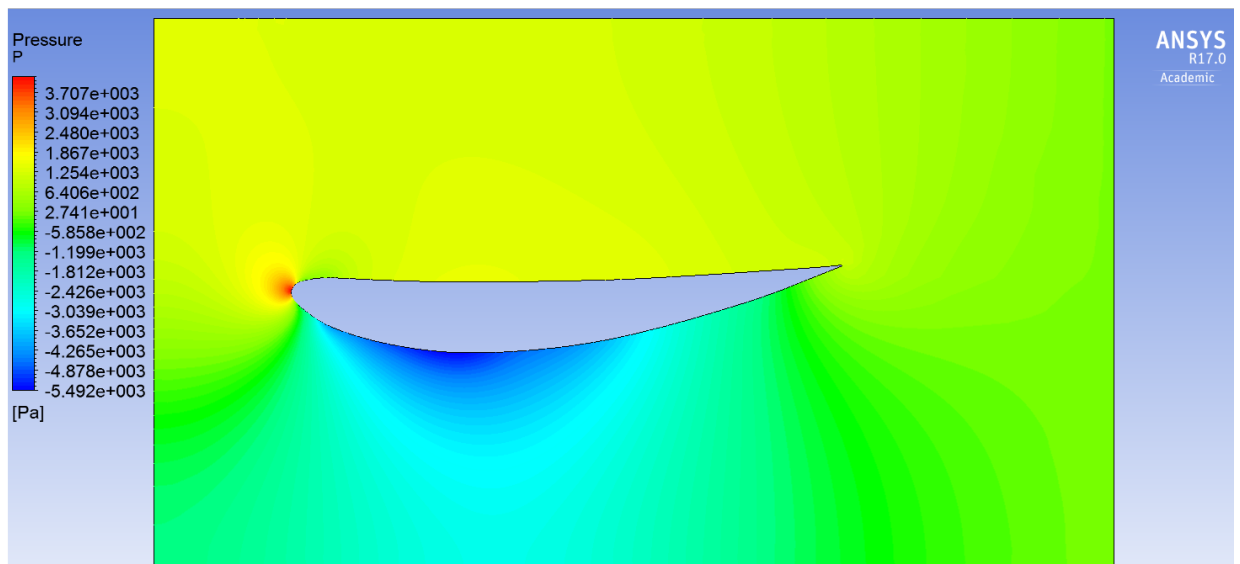


Figura 37: Presiones a lo largo del perfil del plano principal

En la figura 39, podemos observar como varían las presiones a lo largo del perfil. Cabe destacar dos puntos. Primero tenemos una zona rojiza de presión elevada en el borde de ataque del perfil donde la velocidad del fluido se convierte en presión al chocar con el perfil. Y segundo tenemos la superficie inferior del perfil, donde debido a su curvatura, tiene lugar una disminución de presión.

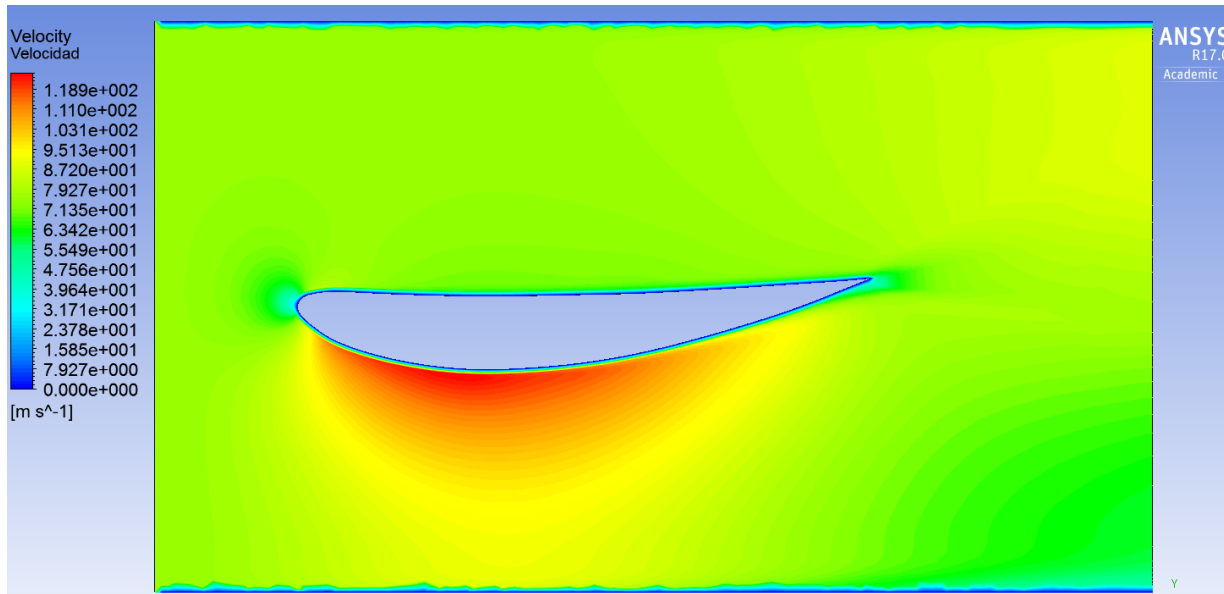


Figura 38: Velocidades a lo largo del plano principal

En la figura 40, podemos observar que por un lado todas las paredes presentan velocidad nula en la zona de contacto que poco a poco va aumentando a medida que nos alejamos de la pared. Por otro lado y de la misma manera que con las presiones tenemos un punto de velocidades bajas en el borde de ataque del perfil debido a que las partículas pierden su velocidad al chocar con el perfil y un aumento de presión debido a la curvatura del perfil en la zona inferior de este.

En conjunto, las figuras 39 y 40, nos sirven para observar claramente la relación que descubrió Bernoulli. En las zonas donde la velocidad aumenta, también se puede apreciar una disminución de la presión y viceversa.

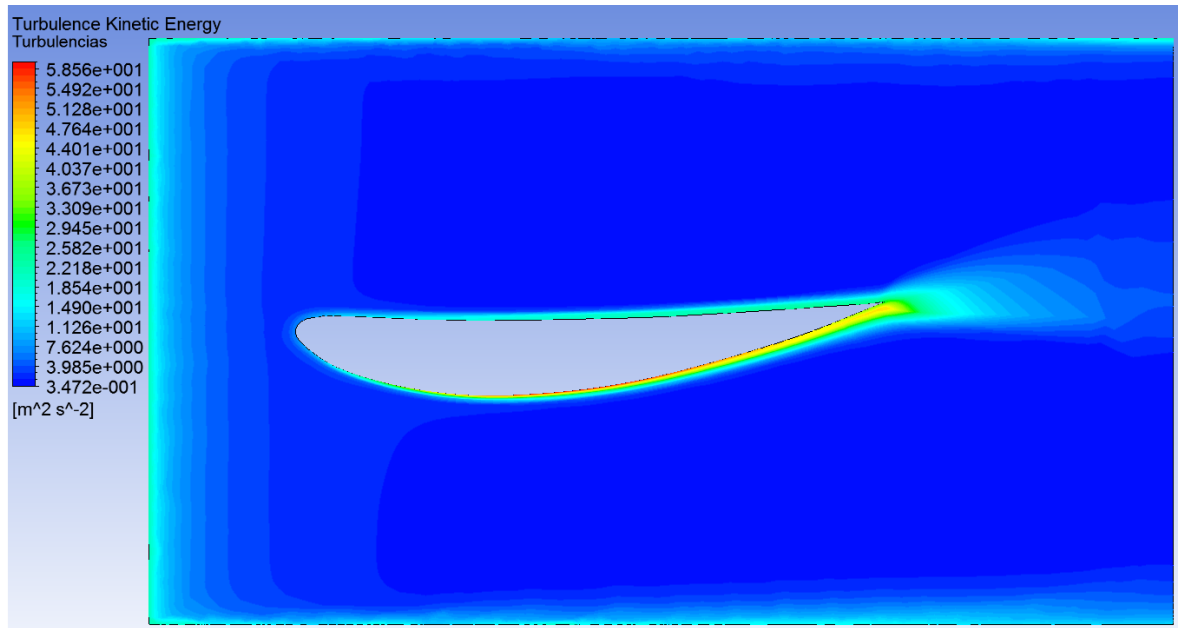


Figura 39: Energía asociada a turbulencias a lo largo del plano principal

Finalmente en la figura 41, podemos observar que en la mayor parte de la geometría la energía asociada a las turbulencias es prácticamente nula distinguiendo únicamente dos zonas. Por un lado a lo largo de la zona inferior del perfil se puede observar cómo va aumentando la turbulencia, esto está directamente relacionado con lo que observamos en la figura 39. A lo largo de dicha superficie se produce un aumento en la velocidad, lo que afecta a la capa límite haciendo que esta pasa de ser laminar ser cada vez mas turbulenta. Por otro lado se pueden observar pequeñas turbulencias en la parte posterior del alerón donde se crea una estela con energía cinética turbulenta ligeramente más elevada. Este fenómeno se debe a la forma del perfil que acaba en punta y no de forma redondeada.

Con estas figuras podemos afirmar que hasta el momento, todos los resultados son coherentes y se corresponden con lo que se esperaban tras el estudio realizado previamente de las ecuaciones que intervienen. Destacando el hecho que todas las figuras desde la 37 hasta la 40 nos indican que no hay desprendimiento de la capa límite hecho fundamental para que el alerón funcione correctamente.

Para concluir hay que mencionar los coeficientes tanto de resistencia al avance como de sustentación. Como podemos ver en la figura 42, tenemos el coeficiente de resistencia al avance en rojo, que presenta valores muy reducidos y positivos, y en verde, el coeficiente de sustentación que tal y como se esperaba es negativo y muy superior al coeficiente de Drag.

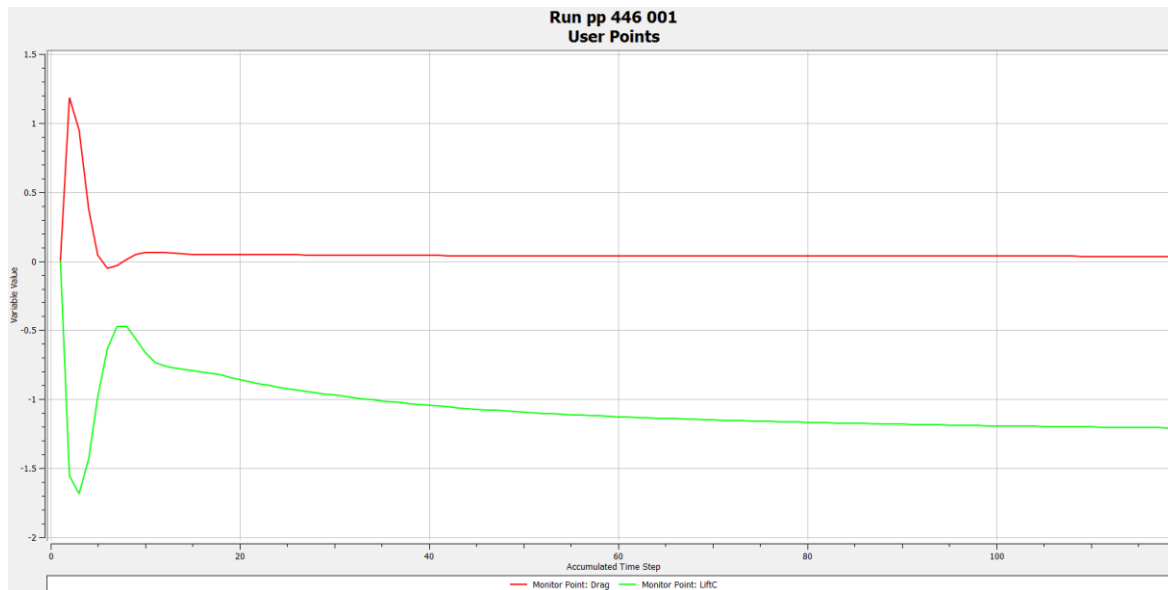


Figura 40: Coeficientes de sustentación, en verde, y de resistencia al avance, en rojo, a lo largo de las iteraciones

Al final de la simulación, hemos obtenido los valores de 0.03528 y -1.2073 para los coeficientes de Drag y Lift correspondientemente.

7.2. Simulación del alerón completo.

7.2.1. Elección del flap externo y diseño del alerón.

Tal y como hemos mencionado anteriormente mientras seleccionábamos el perfil aerodinámico del plano principal, se tendrán en cuenta únicamente los perfiles GOE 462 y GOE 531. Estos perfiles se diferencian principalmente de los asociados con el plano principal por su capacidad de generar una mayor cantidad de downforce y de tener una mayor resistencia al avance.

Como veremos posteriormente, gracias al DRS que hace de este flap una parte móvil, podemos permitirnos añadir esta resistencia al avance extra ya que en los tramos más rápidos dónde es necesario tener el mínimo de resistencia posible podremos reducirla activando el Sistema de Reducción de Drag.

De entre los dos perfiles, nos hemos decidido por el GOE 462 ya que es capaz de generar una mayor sustentación que es una de los papeles más importantes del flap.

Para configurar la geometría completa del alerón se han seguido las siguientes premisas:

- La ranura que se forma entre los perfiles ha de ser convergente, es decir, se ha de ir estrechando desde su apertura hasta su salida. [3, pág. 86]

- El solapamiento entre el borde de ataque del flap y el borde de fuga del plano principal será entre el 1% y el 4 % de la cuerda total. [3, pág. 86]
- El tamaño del flap representará entre el 25% y el 30% de la cuerda total del alerón. [3, pág. 85]

Finalmente obtenemos la configuración para el DRS cerrado que aparece en la siguiente figura:

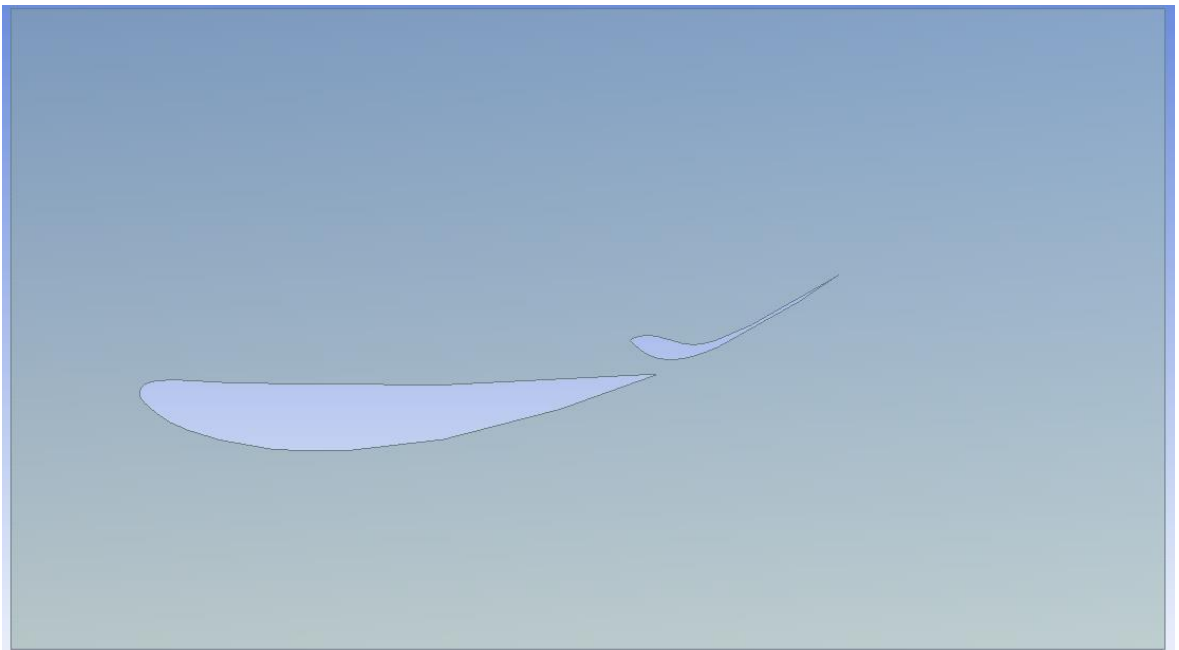


Figura 41: Geometría del alerón completo con el DRS cerrado

Para la configuración con el DRS abierto se ha tenido en cuenta la posición óptima del flap, es decir, aquella en la que el flap presenta un mínimo de Drag.

Esta posición se da con un ángulo de ataque de 6.5° de la cuerda respecto a flujo.

La configuración del con el alerón completo presenta la geometría que podemos ver a continuación en la siguiente figura:

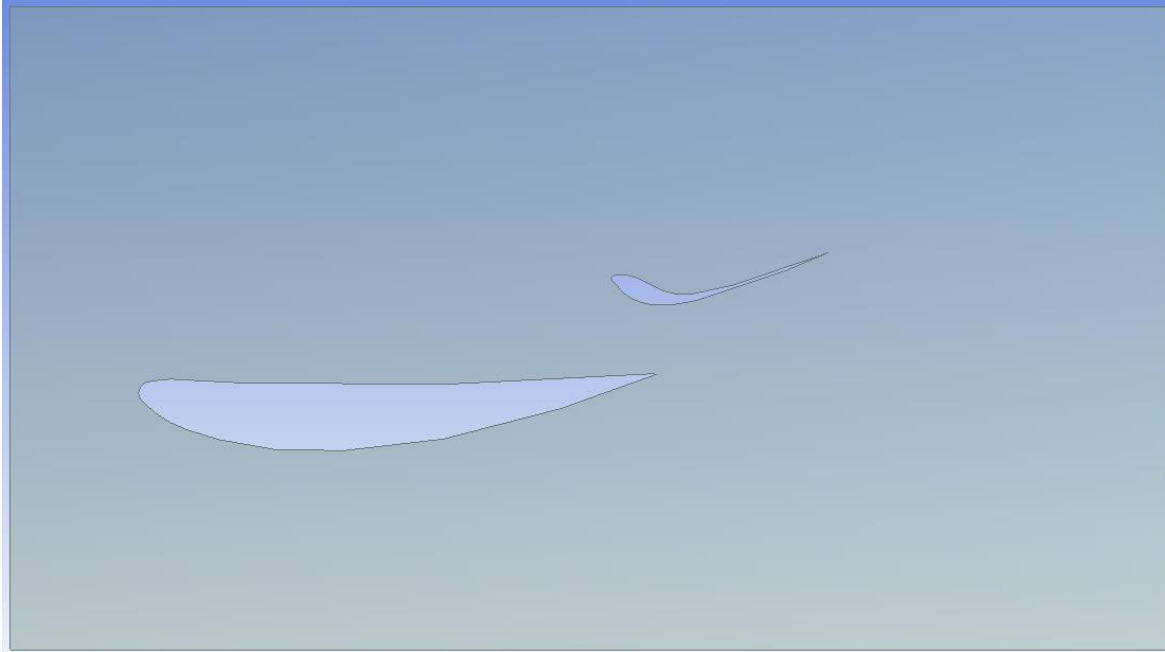


Figura 42: Geometría del alerón completo con el DRS abierto

Cabe mencionar que debido al hecho de tener dos perfiles, se ha tenido que aumentar el tamaño del prisma que los envuelve teniendo finalmente ambos perfiles GOE dentro de un prisma de 400mm x 250 mm x 0,1 mm.

7.2.2. Mallado y configuración.

El añadir otro perfil tan próximo al primero aumenta significativamente la dificultad del mallado haciendo que aparte del "sizing" utilizado tanto el prisma rectangular como en los perfiles se haya tenido que hacer dos "inflatons" por separado.

Esto se debe a que la zona comprendida entre ambos perfiles es muy complicada de mallar sin que se produzcan errores y se han tenido que probar diferentes opciones hasta que hemos dado con los mallados que podemos observar en las figuras 44 y 45.



Figura 43: Mallado del alerón completo con el DRS cerrado

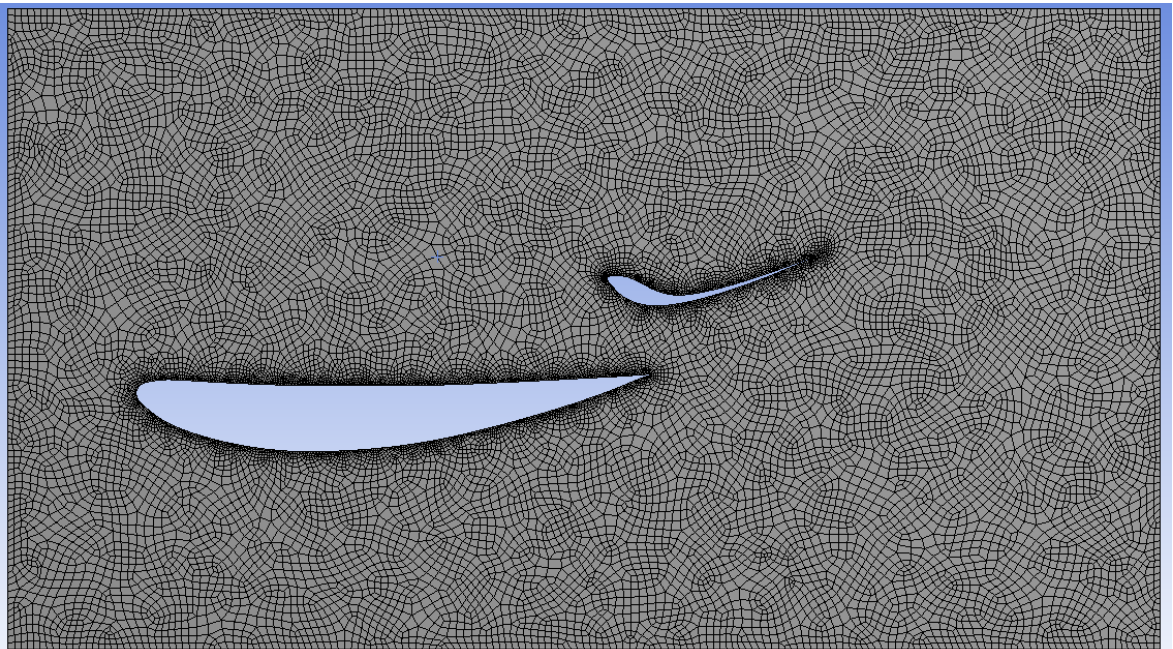


Figura 44: Mallado del alerón completo con el DRS abierto

Como se puede observar, en ambas figuras, 45 y 46, tenemos un mallado menos ordenado que en el caso del plano principal pero que mantiene un mallado muy fino en las superficies de los perfiles hecho imprescindible para una correcta simulación.

En cuanto a la configuración, se ha mantenido la misma configuración que para el alerón principal con la única diferencia de que se ha añadido un nuevo perfil a la condición de "wall"

o pared.

7.2.3. Post-proceso y análisis de resultados

Primero de todo hemos de analizar los residuos.

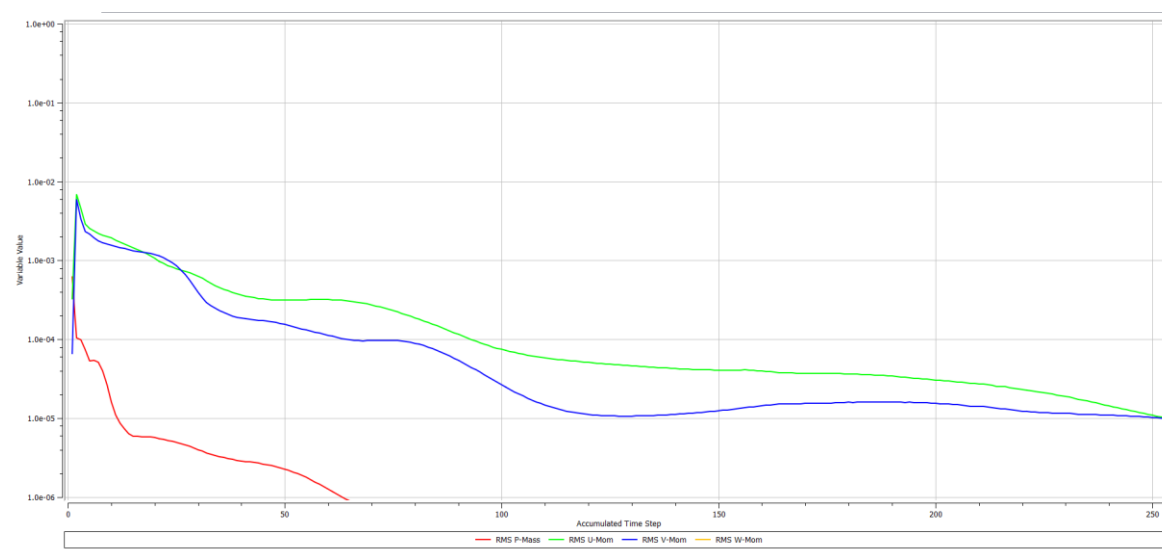


Figura 45. Residuos simulación del alerón completo con el DRS cerrado

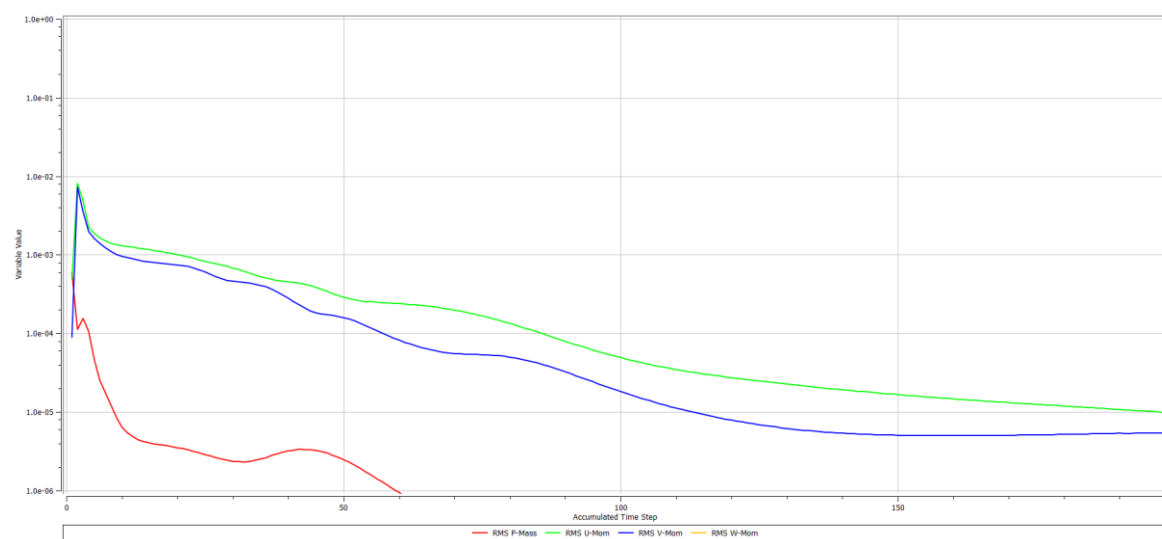


Figura 46: Residuos simulación del alerón con el DRS abierto

Como podemos observar en las figuras 46 y 47, conseguimos alcanzar nuestro objetivo de valores de residuos iguales o inferiores a 1×10^{-5} antes que el límite de de iteraciones. También se puede apreciar que se supera con creces el número de iteraciones que se tarda

en alcanzar dicho objetivo llegando casi a las 200 iteraciones respecto a las aproximadamente 120 de la simulación del plano principal ,hecho que se corresponde con el aumento en complejidad de la geometría simulada.

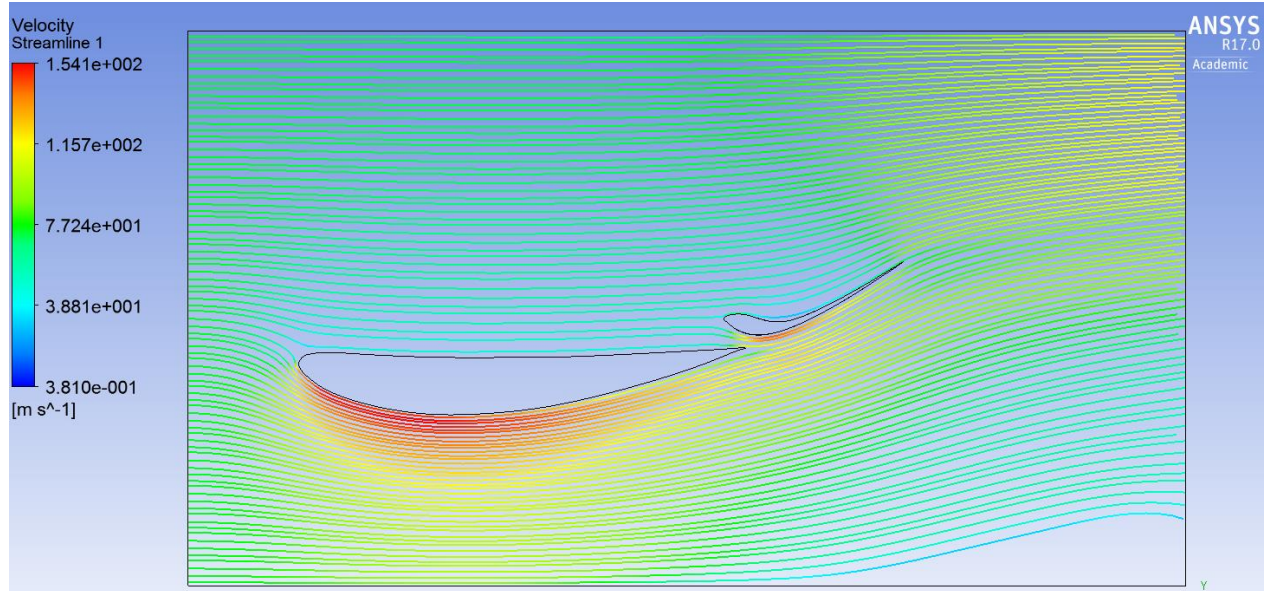


Figura 47: Streamlines del alerón completo con el DRS cerrado

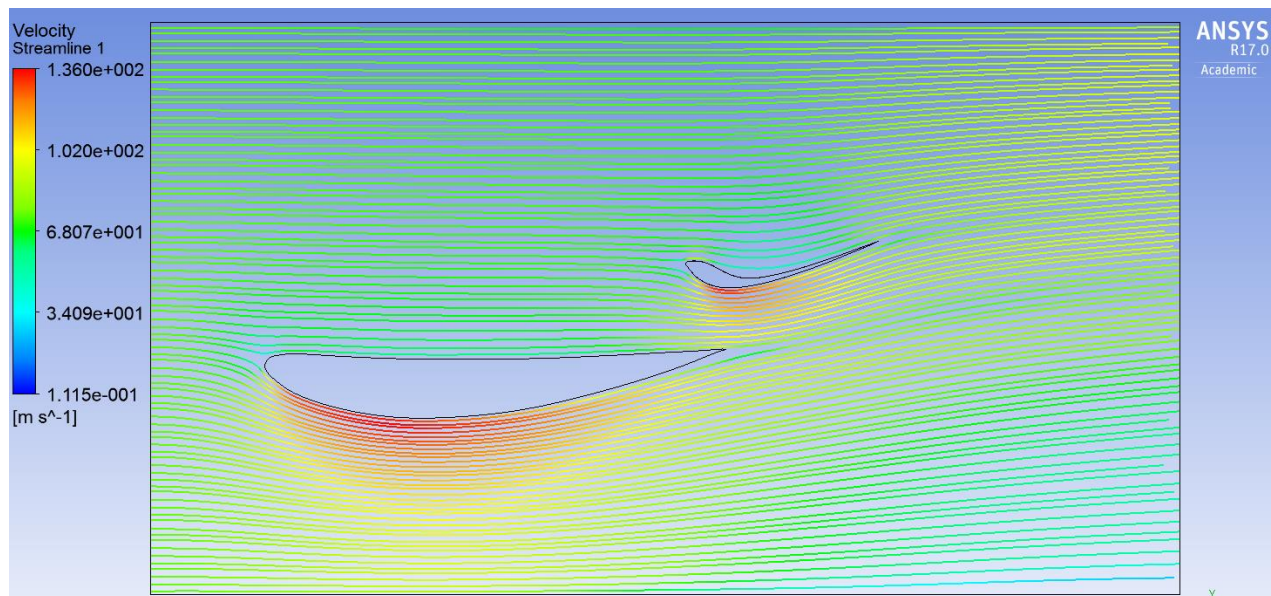


Figura 48: Streamlines del alerón completo con el DRS abierto

Tal y como observamos en las figuras 49 y 50 las líneas de corriente tanto con el alerón abierto como cerrado son bastante similares a las del plano principal. Teniendo en común un aumento de la velocidad en la parte inferior de los perfiles debido a la curvatura teniendo como mayor diferencia que en este caso se trata de dos perfiles y que el carácter

convergente de la ranura que se forma entre los perfiles, provoca una aceleración del flujo a lo largo de ella.

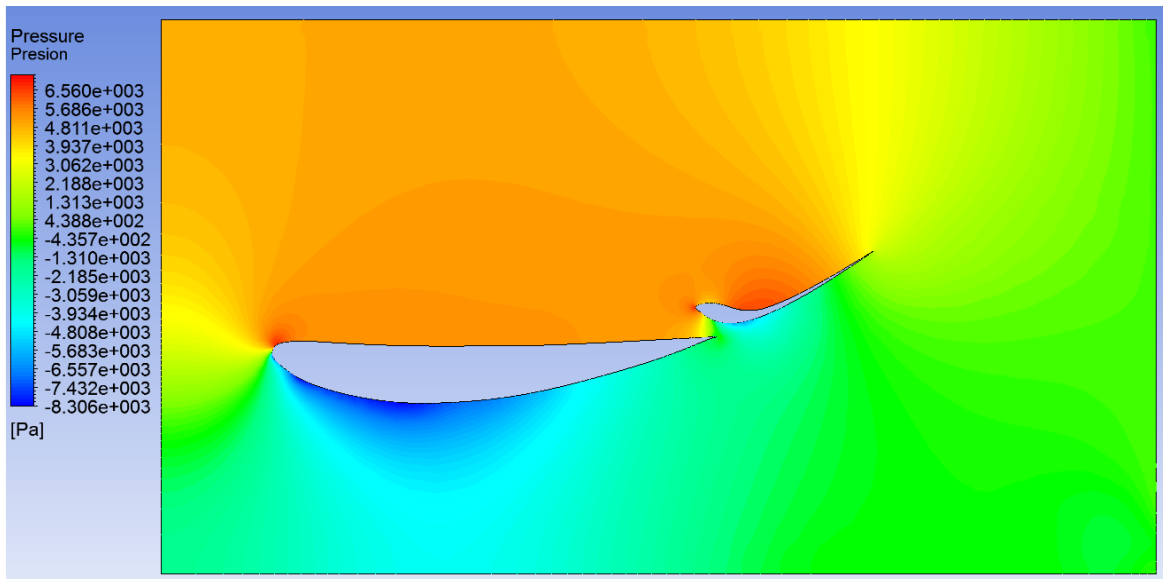


Figura 49: Presiones del alerón con el DRS cerrado

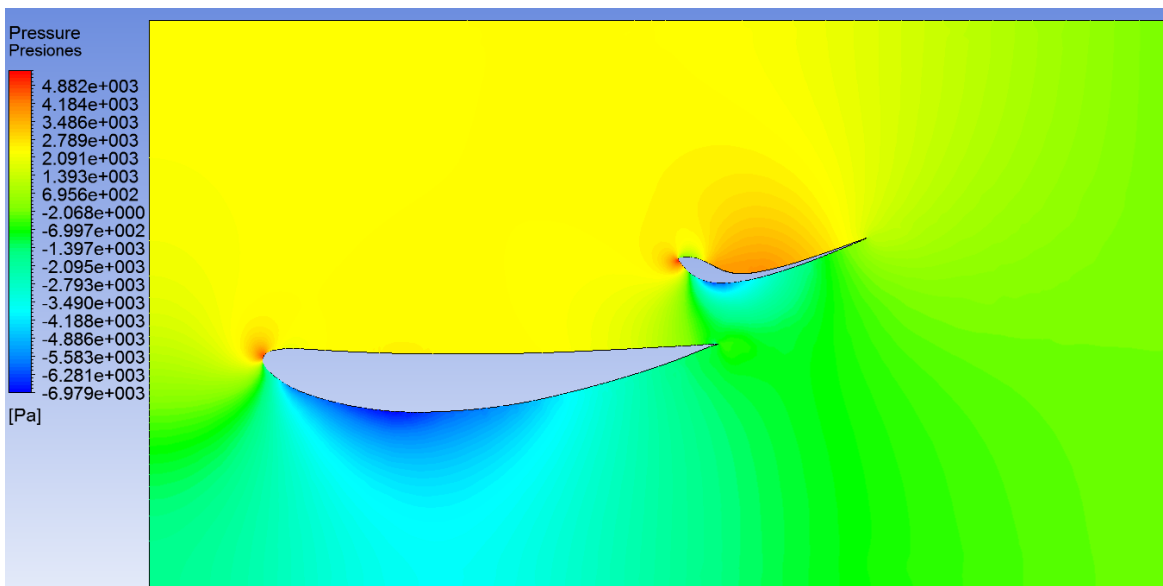


Figura 50: Presiones del alerón con el DRS abierto

Como se puede observar en las figuras 51 y 52 el rango de presiones es mucho mayor comparado con las que obteníamos simulando únicamente el plano principal. Esto se corresponderá con un aumento en los coeficientes.

Especialmente en la figura 51, en la que tenemos el DRS cerrado, se puede observar claramente como el rango de presiones es significativamente mayor al del DRS cerrado.

Esto se debe a que se trata de la configuración del alerón que nos proporcionará el máximo de downforce que se podría necesitar en un circuito, mientras que en el caso del DRS abierto de la figura 51, es una configuración más relaja que se utilizará en rectas en las que no se necesitará el downforce sino reducir la resistencia al avance del monoplaça.

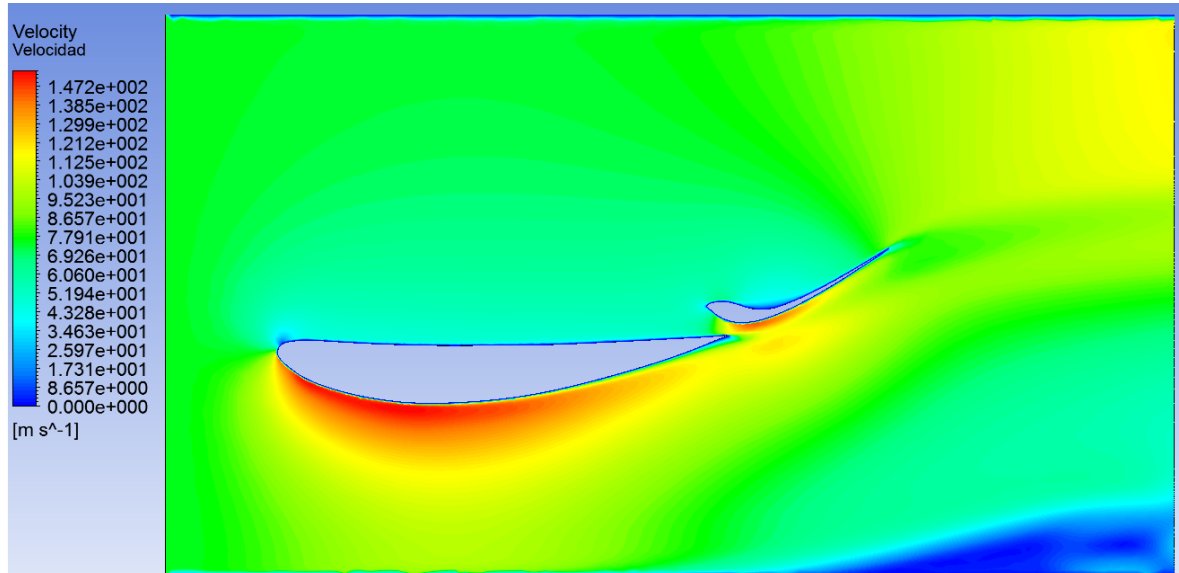


Figura 51: Velocidades del alerón con el DRS cerrado

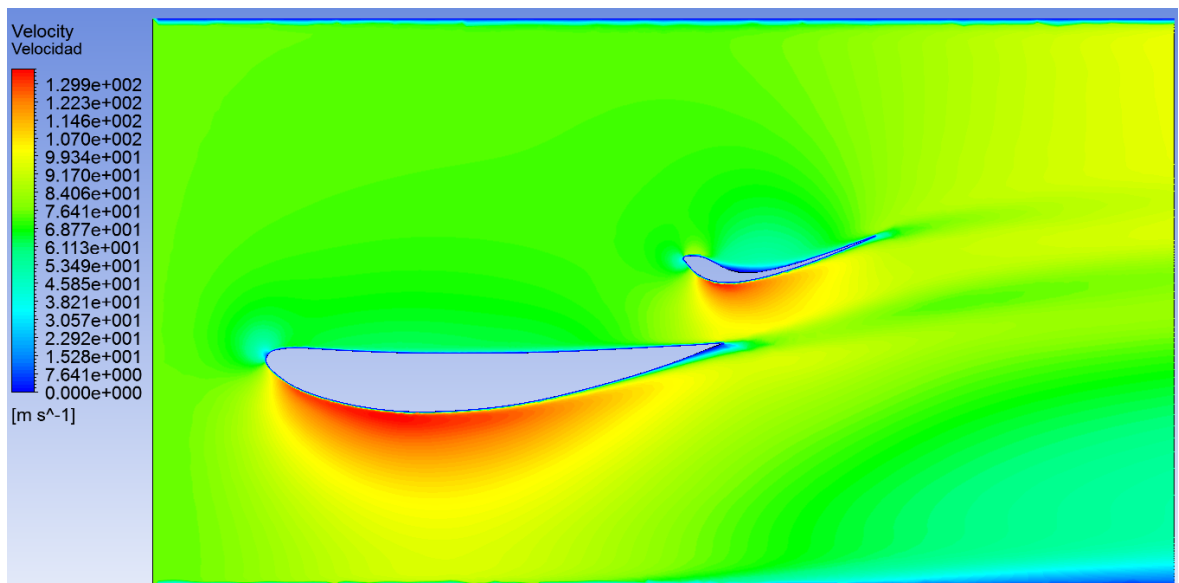


Figura 52: velocidades del alerón con el DRS abierto

De la misma manera que con las presiones, el rango de velocidades es mucha mayor comparado con la simulación del plano principal. De la misma manera que podemos observar velocidades significativamente más elevadas en con el DRS cerrado que con el DRS abierto. Esto se verá reflejado a en los coeficientes de la misma manera que las

presiones, cuanto mayor sea el rango de valores tanto de una magnitud como la otra, mayores serán los coeficientes.

Para finalizar con este apartado, no podemos olvidarnos de analizar los dichos coeficientes.

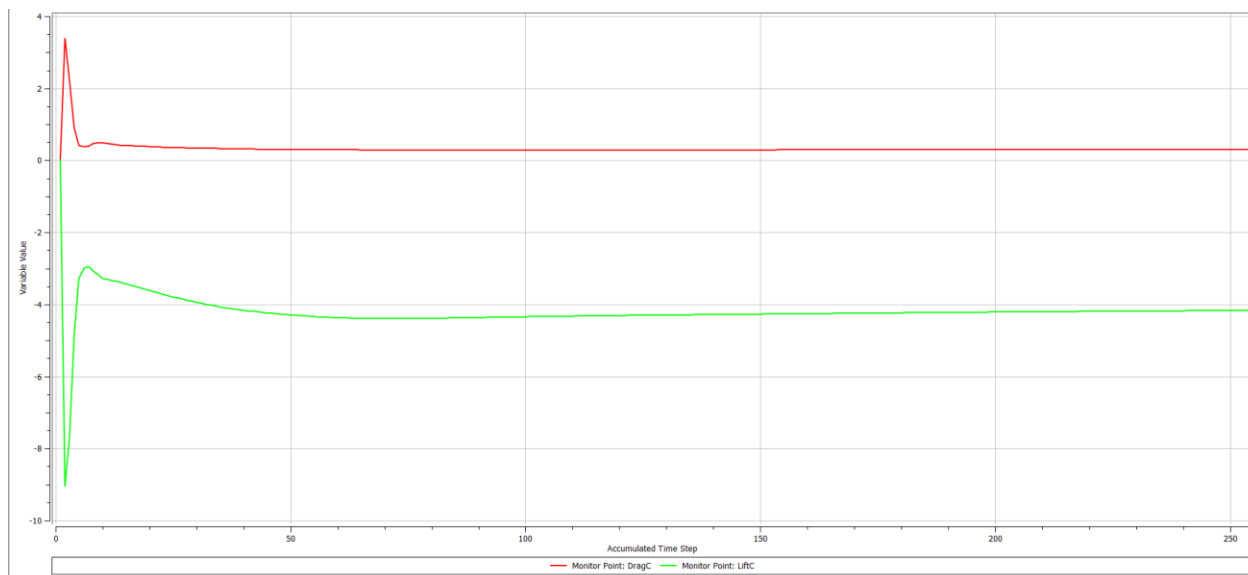


Figura 53: Evolución de los coeficientes de Drag en rojo y Lift en verde a lo largo de las iteraciones con el DRS cerrado

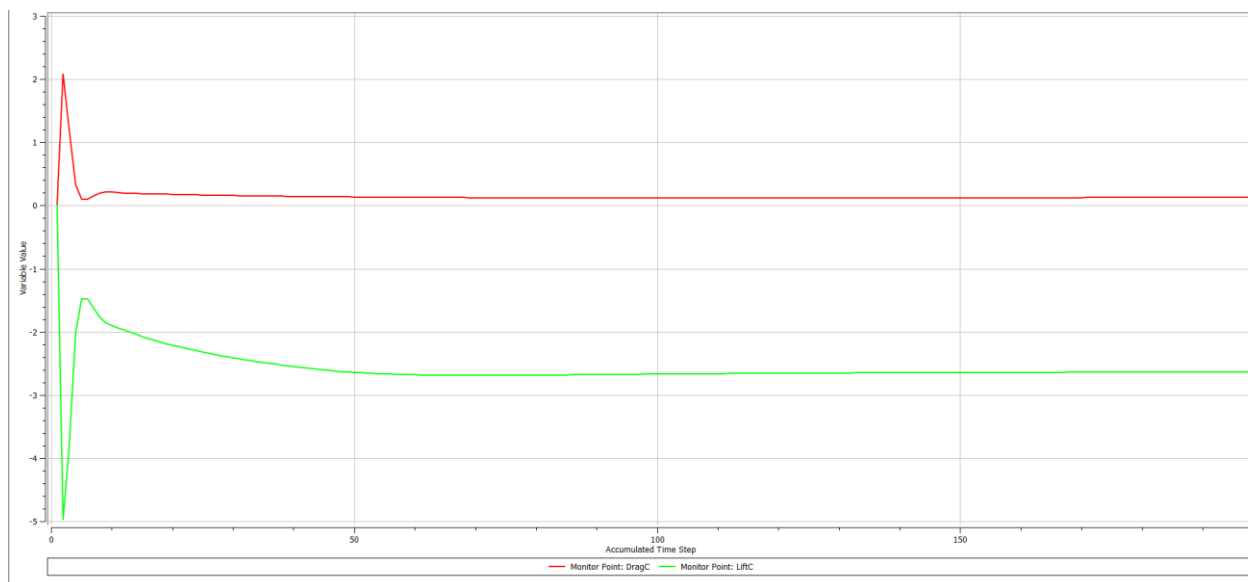


Figura 54: Evolución de los coeficientes de Drag en rojo y Lift en verde a lo largo de las iteraciones con el DRS abierto

Lo primero que podemos observar a primera vista, es que difieren mucho respecto a los calculados con el plano principal como era de esperar. Si los comparamos con los obtenidos

inicialmente obtenemos que:

- Con la configuración del alerón con el DRS cerrado obtenemos un $CD = 0.30545$ y un $CL = -4.1677$
- Mientras que con la configuración de DRS abierto obtenemos un $CD = 0.12526$ y un $CL = -2.6321$

O lo que es lo mismo, respecto al plano principal, con el DRS cerrado tenemos el drag aumenta en un 866% mientras que el lift lo hace 345%. Poniendo en evidencia que mientras que el GOE 446 es un perfil válido para formar un alerón, no lo es por sí solo

Para poder ver con mayor claridad cómo afecta el sistema DRS, compararemos el sistema con el DRS abierto con los datos obtenidos con el DRS cerrado. De esta manera obtenemos que, tal y como observamos en la tabla 1, al abrir el DRS reducimos el drag un 59% sacrificando al mismo tiempo 37% de lift en una zona donde el no es necesaria tanto downforce.

Todo esto pone en evidencia la elevada importancia que tiene el DRS y el motivo por el cual ningún equipo prescinde de él. Es un elemento que te permite mejorar alrededor de un 60% las prestaciones del alerón trasero en cuanto a resistencia al avance se refiere, cuando el piloto elija y apretando únicamente un botón.

Coeficientes	Alerón completo	
	DRS OFF	DRS ON
CD	0,30545	0,12526
CL	4,1677	2,6321
CD%	100%	41,01%
CL%	100%	63,15%

Tabla 1: Comparativa del efecto del DRS

8. Comparativa de circuitos

Para poder aplicar los datos a diferentes circuitos primero hay que estudiarlos.

Para empezar compararemos los trazados que encontramos en las Figuras 58 y 59 que aparecen a continuación.

Lo que primero que podemos distinguir es que el circuito de Mónaco tiene una forma mucho más retorcida de lo que la tiene Monza.

El Gran Premio de Mónaco se caracteriza por la curva número 6 que podemos apreciar en la Figura 57, una curva muy cerrada que va en consonancia con el resto del circuito que está repleto de curvas y carece de rectas largas.



Figura 55: curva 6 del Gran Premio de Monza que caracteriza dicho circuito

El Gran Premio de Italia, podemos ver que tiene un trazado más de 2 km más largo que el de Mónaco, se caracteriza por tener larguísimas rectas y pocas curvas muchas de las cuales son rápidas.

Otra diferencia que hay que mencionar, es que Monza posee dos zonas dónde se puede usar el DRS mientras que Mónaco solo tiene una. De ellas compararemos los casos más extremos, el único tramo que tiene Mónaco, con el que en la Figura 58 es el tramo 2 de DRS ya que es el que tiene una mayor velocidad a la hora de la apertura del DRS, aproximadamente unos 328 km/h [5] en contraposición de los 176 km/h [4] de Mónaco.

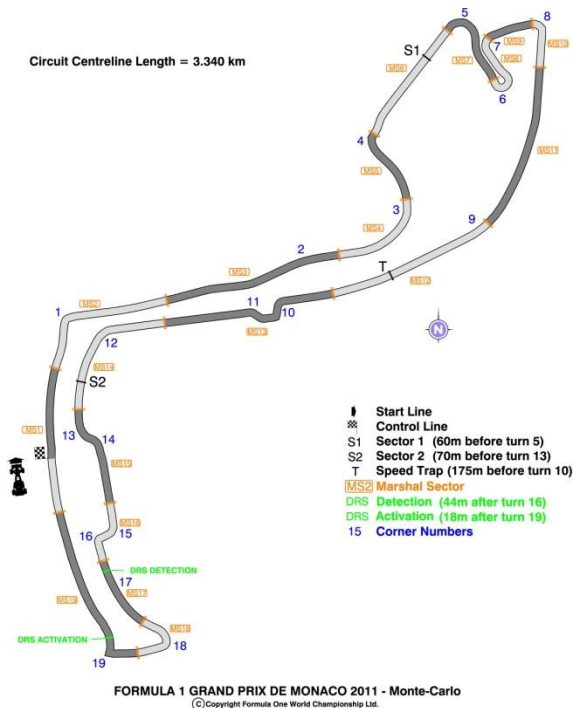


Figura 56: Circuito de Mónaco

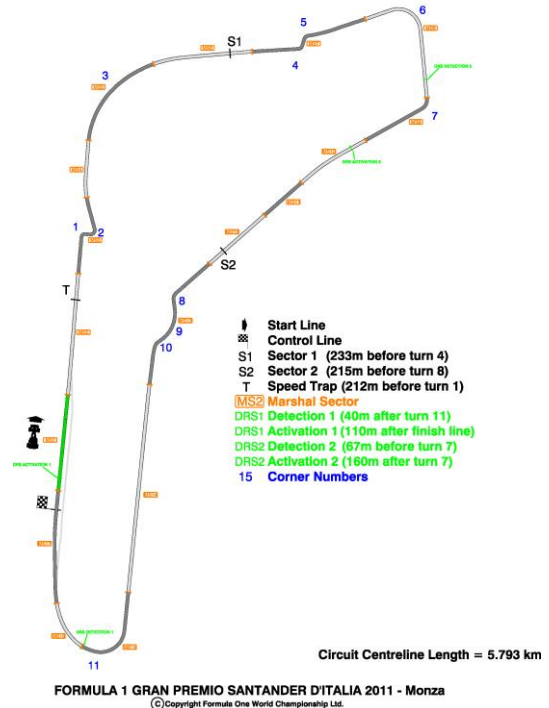


Figura 57: Circuito de Monza

Con todo el estudio que llevamos realizado, es de esperar que el mismo alerón igual no sea de útil en ambos circuitos.

Primero de todo recordemos las fórmulas que intervienen:

$$F_D = \frac{1}{2} c_D \rho A v^2 \quad F_L = \frac{1}{2} c_L \rho A v^2$$

Como se puede deducir a primera vista, la velocidad tiene un papel muy importante.

Únicamente teniendo en cuenta la diferencia de velocidades entre la simulación y los 176 km/h a los que se abre el DRS (se ha optado por esta velocidad ya que se pueden presentar tanto la configuración de DRS abierto como cerrado) en el circuito de Mónaco, obtenemos que se va a generar un 44% menos de Lift y de Drag.

Por lo que nos encontraríamos en un circuito con muchas curvas con menos downforce que nos permita realizar dichas curvas a velocidad elevada.

De esta manera, si supusiésemos que nuestro alerón es el ideal para un circuito en concreto que se caracteriza por velocidades alrededor de los 270 km/h, es obvio, que no sería el óptimo para el gran premio de Mónaco, sino que se necesitaría un alerón capaz de generar mucha más downforce a las velocidades propias del circuito.

Si ahora mirásemos el circuito de Monza. Únicamente mirando la diferencia de velocidades, tendríamos que se estaría generando el mismo alerón un 147% más de lift y drag. Por lo que nos encontraríamos en un circuito donde no necesitamos mucho lift generando un exceso de resistencia al avance.

Como podemos observar, se trata de un tema muy delicado donde generalmente alterar un factor o una condición de funcionamiento puede alterar completamente el comportamiento de un alerón. Además, en el caso de un circuito en concreto, quisiéramos aumentar o disminuir ya sea el drag o el lift, probablemente al mismo tiempo que hiciésemos modificaciones para mejorar en uno de estos aspectos, también estaríamos modificando el otro y no necesariamente en la dirección deseada. Todo esto hace de la aerodinámica un tema muy complicado donde lo difícil no es encontrar una configuración con una característica muy favorable, sino el verdadero reto se encuentra en encontrar configuraciones equilibradas en sus diferentes características que hagas de esta configuración la mejor para un circuito y unas condiciones concretas.

9. Impacto ambiental

Antes de finalizar esta memoria y no menos importante que el resto, es necesario hablar del impacto ambiental que se ha generado mientras se realizaba.

Gracias a que hemos utilizado un programa de simulación y no se ha recurrido a otros medios menos novedosos como podría ser el túnel de viento, el impacto ambiental producido es relativamente bajo.

Se calcula que el uso del equipo informático junto con la iluminación tienen un consumo de 600W. A lo largo de los meses en los que se ha realizado el proyecto, se calcula que se han destinado alrededor de 900 lo que nos da unos 540.000 Wh.

Utilizando la ayuda de arboliza [6], se ha estimado que este consumo ha conllevado la generación de 351 kg de dióxido de carbono contribuyendo al calentamiento global.

10. Conclusiones

Tras este estudio de lo primero que podemos darnos cuenta es que la aerodinámica de competición es un tema muy delicado. De un circuito a otro, las condiciones varían enormemente por lo que la configuración óptima del alerón también lo hace. En el caso más extremo, se podría incluso hablar de cambiar hasta el perfil del alerón de un circuito a otro. Por otro lado y desde una postura más conservadora, hablaríamos de que es indispensable modificar los ángulos de ataque.

En el caso del circuito de Mónaco, la configuración del plano principal elegido esta lejos de ser la óptima. Esta configuración ha sido elegida para velocidades de 270 km/h y por ser un perfil que se comporta bien a velocidades superiores ya que presenta un coeficiente de drag realmente bajo. En este circuito tan solo se alcanza esta velocidad en algunas zonas concretas pero está lejos de ser la tónica del circuito. Sin embargo, sí que se caracteriza por sus curvas cerradas que requieren de una elevada carga aerodinámica para poder realizarlas a una mayor velocidad. Por esto, es típico de Mónaco los alerones con un elevado coeficiente de sustentación y optimizados a unas velocidades inferiores.

Por otro lado, tenemos el caso del Gran Premio de Italia, donde se ha llegado a registrar una velocidad media de hasta 260km/h [2]. En este caso, nuestra configuración no es tan descabellada aunque es obvio que al tratarse de una materia tan delicada tampoco se tratará de una configuración óptima por las limitaciones del estudio. En este circuito predominarán los alerones con una resistencia al avance mínima para poder aprovechar al máximo el recorrido recto y con pocas curvas de Monza.

Por lo tanto, aunque nuestro alerón nos ha servido para cumplir el objetivo de este proyecto de cuantificar de manera aproximada cuánto puede influir el dispositivo del DRS, es obvio que no se trata de un alerón que se utilizaría a día de hoy en ninguno de los dos circuitos.

En cuanto a las conclusiones acerca del DRS, se pone de manifiesto las razones por las que se ha convertido en un elemento imprescindible desde su implantación en 2011. En una competición tan disputada como lo es la Fórmula 1 y en un campo tan delicado y sensible como es la aerodinámica, se trata de un elemento que te permite mejorar las prestaciones de uno de los componentes aerodinámicos del monoplace alrededor de un 60% cuando el piloto decida con tan solo apretar un botón. Este es un lujo que hasta en el circuito de Mónaco que es uno de los más lentos de la competición ningún equipo se puede permitir el lujo de prescindir.

De la comparativa entre circuitos, también podemos extraer la conclusión que la velocidad es un factor que lo cambia todo en la aerodinámica del circuito. Y que únicamente en el

alerón trasero se pueden observar diferencias de entre 40% y el 150% o incluso superiores debidas exclusivamente a la diferencia de velocidades. Dejando claro que cada conjunto de circuito con todas las condiciones y factores que puedan intervenir tendrá una configuración para cada elemento aerodinámico diferente siendo muy complicando y siendo todo un reto encontrar configuraciones equilibradas óptimas.

Para concluir y a modo de resumen se puede decir que la aerodinámica es un aspecto muy delicado, especialmente si hablamos en términos de competición, donde cualquier factor, ya sea directamente como la configuración de la electrónica del monoplaza, o indirectamente como podrían ser las condiciones meteorológicas, afecte rendimiento del vehículo lo puede cambiar todo. Esto lo convierte en un aspecto muy complicado de optimizar y a la vez muy importante del monoplaza donde intentar mejorar en un aspecto te puede suponer empeorar en otro igual de importante. Siendo todo un desafío para los aerodinamistas de los diferentes equipos, no el encontrar una configuración muy buena en un aspecto, sino una configuración equilibrada en todos sus aspectos que permitan un rendimiento óptimo del monoplaza en cada gran premio y adaptado a los diferentes factores como puede ser la situación atmosférica en el momento de la competición.

Quedan perfectamente justificados la cantidad de personal, tiempo y capital que invierten en la aerodinámica de los monoplazas las diferentes escuderías y pone de evidencia, que nadie puede prescindir de un sistema tan potente como es el DRS que te permite mejorar tanto presionando únicamente un botón.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] AIRFOILTOOLS [<http://airfoiltools.com/compare/index>]
- [2] ANEXO: RÉCORDS DE LA FÓRMULA 1
[https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:R%C3%A9cords_de_F%C3%B3rmula_1]
- [3] McBEATH, SIMON. *Aerodinámica del automóvil de competición*.
- [4] VUELTA DE CLASIFICACIÓN PARA LA POLE EN EL CIRCUITO DE MÓNACO 2014:
<https://www.youtube.com/watch?v=snLJcpvCmxM>
- [5] VUELTA DE CLASIFICACIÓN PARA LA POLE EN EL CIRCUITO DE MONZA 2014:
<https://www.youtube.com/watch?v=G9volbr3Z-Q>
- [6] CALCULADORA DE PRODUCCIÓN DE CO₂ POR KWH:
<http://arboliza.es/compensar-co2/calculo-co2.html>
- [7] Figura 1: Chaparral 2E de 1966:
<http://www.motortrend.com/news/chevrolet-chaparral-vision-gran-turismo-concept-bound-for-l-a/>
- [8] Figura 2 y 3: Esquemas de flujos laminar y turbulento:
<http://www.cfdsupport.com/OpenFOAM-Training-by-CFD-Support/node263.html>
- [9] Figura 4: Esquema velocidades de la capa límite:
<http://aviaciongeneral15.blogspot.com.es/2011/04/principios-basicos.html>
- [10] Figura 5: Capa límite en un ala:
<http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/accp/al0966/le2.htm>
- [11] Figura 6: Separación de capa límite:
<https://www.ehu.eus/es/web/get/eskainitako-zerbitzuak>
- [12] Figura 8: Fuerza de sustentación:
<http://jordiventura11.blogspot.com.es/2012/05/por-que-vuelan-los-aviones.html>
- [13] Figura 9: Relación entre la forma y el coeficiente de drag:
<http://www.usa7s.net/vb/showthread.php?9898-Drag-Drag-and-More-Drag/page2>

- [14] Figura 10: Esquema comparativo de un perfil de un ala y de un alerón y la fuerza de sustentación que generan:
<http://www.mre-books.com/sa106/hipomustang10.html>
- [15] Figura 11: Esquema de las componentes de la fuerza aerodinámica:
<http://www.reocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/5249/aerodinamica/fuerzaaero.htm>
- [16] Figura 12: Tipos de mallado:
http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-025X2005000100004&script=sci_arttext
- [17] Figura 13: Ecuaciones de Navier-Stokes:
<http://www.personal.psu.edu/users/w/z/wzl113/Lesson%20Plan.htm>
- [18] Figura 14: Spoiler moderno utilizado en la Nascar:
http://www.charlotteobserver.com/sports/nascar-auto-racing/thatsracin/4w5qpl/picture28657858/ALTERNATES/FREE_960/spoilerart2
- [19] Figura 15: Funcionamiento de un spoiler:
McBEATH, SIMON. *Aerodinámica del automóvil de competición*. pág. 59
- [20] Figura 16: Parte de un perfil alar:
McBEATH, SIMON. *Aerodinámica del automóvil de competición*. pág. 74
- [21] Gráfico 1: Efecto del grosor en el coeficiente de sustentación:
McBEATH, SIMON. *Aerodinámica del automóvil de competición*. pág. 80
- [22] Figura 17: Alerón de dos elementos con flap externo:
McBEATH, SIMON. *Aerodinámica del automóvil de competición*. pág. 84
- [23] Figura 18: Alerón de dos elementos con flap tipo Fowler
McBEATH, SIMON. *Aerodinámica del automóvil de competición*: pág. 85
- [24] Figura 19: Alerón de 3 elementos:
McBEATH, SIMON. *Aerodinámica del automóvil de competición*. pág. 88
- [25] Figura 20: Alerones de múltiples elementos
McBEATH, SIMON. *Aerodinámica del automóvil de competición*. pág. 91
- [26] Figura 21: Fórmula 1 con el DRS abierto y cerrado.
https://es.wikipedia.org/wiki/Aler%C3%B3n_trasero_m%C3%B3vil

- [27]** Figuras 23, 24, 25, 26, 27 y 28: Mecanismo de activación del DRS:
<http://forum.motorionline.com/index.php?showtopic=25080>

- [28]** Figuras 29, 30, 31 y 32: Perfiles tenidos en cuenta:
[\[http://airfoiltools.com/compare/index\]](http://airfoiltools.com/compare/index)

- [29]** Figuras de las 33 a la 54: Extraídas de las simulaciones realizadas con el programa CFX de ANSYS.

- [30]** Figura 55: Curva 6 del Gran Premio de Mónaco:
http://www.velocidadatope.com/VAT/F1/2015/06Monaco/monaco_gran_premio_f1.jpg

- [31]** Figuras 56 y 57: Circuitos de Mónaco y Monza con las zonas de DRS:
<http://www.f1fanatic.co.uk/>

Bibliografía complementaria

- 1) http://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model
- 2) https://www.formula1.com/en/championship/inside-f1/rules-regs/Bodywork_and_dimensions_and_Cockpit.html
- 3) https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_reduction_system
- 4) https://es.wikipedia.org/wiki/Aler%C3%B3n_trasero_m%C3%B3vil
- 5) <http://scarbsf1.com/?p=3372>
- 6) <http://www.formula1-dictionary.net/wings.html>
- 7) <http://www.motorsport.com/f1/news/bite-size-tech-mercedes-w07-rear-wing-788768/>
- 8) https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_reduction_system
- 9) https://www.formula1.com/content/fom-website/en/championship/inside-f1/rules-regs/Drag_Reduction_System.html
- 10) <http://www.racecar-engineering.com/articles/f1/drs-the-drag-reduction-system/>
- 11) <http://www-f1.ijs.si/~rudi/sola/Turbulence-models-in-CFD.pdf>
- 12) http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_modeling
- 13) <http://www.cfd-online.com/Forums/cfx/>
- 14) <http://es.mclaren.com/formula1/>
- 15) <https://tecnicaf1.wordpress.com/2011/12/08/elementos-aerodinamicos-de-un-formula-1/>
- 16) <http://es.motorsport.com/f1/news/tecnica-aleron-trasero-cuchara-mercedes-810151/>
- 17) <http://www.motorsport.com/f1/news/haas-introduces-double-waved-rear-wing-813657/>
- 18) https://www.youtube.com/watch?annotation_id=annotation_3380113677&feature=iv&src_vid=6RvLtWr07uE&v=ngNZdyWTUlo

- 19) https://www.youtube.com/watch?annotation_id=annotation_438545739&feature=iv&src_vid=ngNZdyWTUlo&v=QBcJubC6LEI
- 20) https://www.youtube.com/watch?annotation_id=annotation_104980903&feature=iv&src_vid=QBcJubC6LEI&v=6RvLtWr07uE
- 21) https://www.youtube.com/watch?annotation_id=annotation_3528621537&feature=iv&src_vid=6RvLtWr07uE&v=2lhkyt9eV4g
- 22) <http://www.reocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/5249/aerodinamica/fuerzaaero.html>
- 23) Material complementario de la asignatura Computational Fluid Dynamics del ETSEIB.